

Eindrapport Elektrostatisch concept

Praktijkonderzoek "Elektrostatisch concept in Thomassentunnel"



Status: Definitief eindrapport
Rapportnummer: DVS-2009-015
Datum: December 2009

Colofon

Titel	Praktijkonderzoek "Elektrostatisch concept in Thomassentunnel"	
Rapportnummer	DVS-2009-015	
Status	Definitief	
Datum van publicatie	December 2009	
Opdrachtgevers	Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart (DVS) Afdeling Innovatie & Implementatie (MII) Innovatieprogramma Luchtkwaliteit (IPL) Van der Burghweg 1 Postbus 5044 2600 GA Delft	
Uitgevoerd door	<u>Data-analyse en rapportage</u> TNO Bouw en Ondergrond Postbus 80015 3508 TA Utrecht	
Informatie	DVS-loket Tel. (088) 798 25 55 E-mail: dvsloket@rws.nl	
Dit rapport is samengesteld door	M.H. Voogt (TNO) J.H. Duyzer (TNO)	
Medewerking van	<u>Elektrostatisch concept</u> BAM Infratechniek bv Plantijnweg 32 Culemborg	<u>Meetapparatuur</u> M+P raadgevende ingenieurs Postbus 2094 5260 CB Vught
Rapport downloaden	www.verkeerenwaterstaat.nl (actueel/publicaties)	
Trefwoorden	Luchtkwaliteit, Elektrostatisch Concept, tunnels	
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.

Voorwoord

Voor u ligt het eindrapport van de praktijkproef van het Elektrostatisch Concept. Voorafgaand aan de proef is dit concept door het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit gekenmerkt als één van de kansrijke maatregelen om luchtkwaliteit langs snelwegen te verbeteren.

Het idee is ingebracht door BAM Infratechniek bv (in het vervolg BAM genoemd) in samenwerking met de Technische Universiteit Delft (TU Delft). Het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit heeft BAM opdracht gegeven om de praktijkproef samen met het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit uit te voeren. Het gebruik van een geschikte proeflocatie – de Thomassentunnel in de A15 - is verzorgd door Innovatieprogramma Luchtkwaliteit. De metingen zijn gefaciliteerd door het Innovatieprogramma Luchtkwaliteit en uitgevoerd door het bureau M+P. Het Elektrostatisch Concept is door TUD en BAM ontworpen, gemonteerd en onderhouden. De data-analyse en de rapportage is verzorgd door TNO.

Primair doel van deze praktijkproef is vast te stellen of het Elektrostatisch Concept fijn stof (PM₁₀) uit de lucht kan verwijderen.

Voorafgaand aan de uitvoering van de proef is de veiligheid met betrekking tot de hoogspanning van het systeem onderzocht door KEMA. Gezondheidsaspecten zijn beschouwd door de Technische Universiteit Delft. De rapportage hiervan is beoordeeld door TNO. Op basis van deze onderzoeken, die zijn opgenomen in de bijlagen van dit rapport, is geconcludeerd dat de praktijkproef veilig kon worden uitgevoerd. De benodigde mutaties aan de tunnel zoals plaatsing van het elektrostatisch systeem en de meetopstellingen zijn vooraf door specialisten tunnelveiligheid van Rijkswaterstaat goedgekeurd.

Tijdens de uitvoering van de proef is verder onderzocht of het Elektrostatische Concept invloed zou kunnen hebben op bestaande tunnelinstallaties, bijvoorbeeld als gevolg van depositie van fijn stof op de installaties. De resultaten van dat onderzoek zijn opgenomen in de bijlagen van dit rapport.

Ten slotte is aandacht besteed aan de effecten van fijn stof reductie in tunnels op de luchtkwaliteit bij tunnelmonden. Ook dat onderzoek is opgenomen in de bijlagen.

Wij bedanken iedereen die heeft bijgedragen aan de succesvolle uitvoering van deze praktijkproef. Naast BAM, TU Delft, TNO en M+P zijn dat vooral ook de medewerkers van Rijkswaterstaat die verantwoordelijk zijn voor het tunnelbeheer en het Verkeersloket. Zonder hun medewerking en flexibiliteit was het niet mogelijk geweest de proef uit te voeren. Tevens bedanken we de leden van de wetenschappelijke begeleidingscommissie die de proef heeft begeleid. De uitvoering van de proef en de wijze van data analyse zijn in nauw overleg met de begeleidingscommissie bepaald. In de commissie hebben deelgenomen medewerkers van: BAM, h3mhuijben Consultancy, M+P, Rijkswaterstaat (Dienst Verkeer en Scheepvaart/ Directie Techniek en Infrastructuur-veiligheid), Technische Universiteit Delft en TNO.

Innovatieprogramma Luchtkwaliteit.

Inhoudsopgave

English summary	5
Samenvatting	11
1 Inleiding	17
2 Beschrijving van de tunnel en het elektrostatisch concept.....	19
2.1 Tunneleigenschappen	19
2.2 Omgeving	20
2.3 Elektrostatisch concept	20
3 De meetstrategie.....	23
3.1 Processen in de tunnel	23
3.2 Meetlocaties	24
3.3 Meetapparatuur	25
3.4 Beïnvloeding van de concentraties in de tunnel door andere factoren.....	25
3.5 Fasering.....	29
4 Kwaliteitsborging.....	31
4.1 Inleiding	31
4.2 Onderzoek naar beïnvloeding van de metingen door het elektrostatisch concept	32
4.3 Ontbrekende of afgekeurde meetdata	33
4.3.1 GRIMM	33
4.3.2 TEOM.....	33
4.3.3 NO _x	34
5 Data-analyse methode	35
5.1 Analyse van gemiddelden.....	35
5.2 Analyses in Fase 1 en 2	36
5.3 Behandeling van uitbijters.....	37
6 Resultaten	39
6.1 Geselecteerde meetdagen en -intervallen.....	39
6.1.1 Fase 1.....	39
6.1.2 Fase 2.....	39
6.2 Omstandigheden.....	40
6.2.1 Fase 1.....	40
6.2.2 Fase 2.....	41
6.3 Effectiviteit in Fase 1 bij een schakelinterval van 100 minuten	42
6.3.1 Gemiddelde effectiviteit.....	42
6.3.2 Afhankelijkheid van de luchtvochtigheid	43
6.3.3 Conclusies voor Fase 1	44
6.4 Effectiviteit in Fase 2 bij een schakelinterval van 24 uur.....	44
6.4.1 Gemiddelde effectiviteit.....	44
6.4.2 Afhankelijkheid van de luchtvochtigheid	46
6.4.3 Verloop van het effect over de dag	46
6.4.4 Conclusies voor Fase 2	48
7 Optimalisatie.....	49
8 Toepasbaarheid.....	51
9 Conclusies en Aanbevelingen	53
Referenties.....	57

Bijlage A Meetsystemen	59
Bijlage B GRIMM metingen	63
Bijlage C Between sampler vergelijkbaarheid.....	67
Bijlage D Onderzoek naar beïnvloeding van metingen door het elektrostatisch concept.....	69
Bijlage E Invloed van uitsluiten van minuten aan begin van de 100 minuten intervallen.....	73
Bijlage E Invloed van uitsluiten van minuten aan begin van de 100 minuten intervallen.....	73
Bijlage F Omstandigheden in de buitenlucht	75
Bijlage G Verdelingen uit Fase 2.....	77
Bijlage H Rapportage TU Delft & BAM	79
Bijlage I Gezondheidsnotitie (TU Delft & BAM)	80
Bijlage J Elektrische veiligheid van het concept (KEMA).....	81
Bijlage K Testen van de meetapparatuur voorafgaand aan de proef (M+P).....	82
Bijlage L Berekening bij tunnelmonden(TNO).....	83

English summary

BAM and the Technical University of Delft (TUD) have developed a system to reduce particulate matter concentrations in tunnels, referred to as electrostatic concept. The system is based upon a set of electrically charged wires mounted on one of the walls. The electric field resulting from these charged wires will charge particles suspended in the tunnel air. These charged particles will easily be caught by another part of the system; a set of electrically grounded metal screens mounted on the other wall. First experiments carried out in a small scale tunnel showed that the mass concentration in the tunnel could be reduced by 15% when the system was switched on. Number concentrations of particles would even go down by nearly 50%.

In the framework of IPL the efficiency of the system to reduce fine particle concentrations (PM_{10} and $PM_{2.5}$) was tested in a large scale field test in the Thomassentunnel (part of the A15 motor way) in the Rotterdam industrial area. The concept was installed in the tunnel in a certain configuration of elements in the summer of 2009. The primary goal of the experiment was to assess whether a significant reduction of the concentration of PM_{10} and $PM_{2.5}$ could be achieved by application of the concept in the configuration that was installed in the Thomassentunnel. The secondary goal was to increase understanding of the processes and driving parameters in order to be able to extrapolate the results to other conditions.

Measurements in the Thomassentunnel

The Thomassentunnel is a 1100 m long tunnel in the A15 lying from east to west. It consists of two tubes. The right side tube has three lanes and the left side tube has two lanes and a spare lane. Measurements were carried out in the left side tube. The tunnel is some 5 m high and the tube is nearly 15 m wide. Traffic density equals 23000 motor vehicles per day (with 14 % heavy trucks and 12% light trucks) No forced ventilation is used under normal conditions. Wind flow in the tunnel is mainly driven by the car flow.

During the experiment M+P consultants carried out measurements on four locations (three inside and one outside the tunnel). The equipment was set up near the entrance of the tunnel to obtain information on background concentrations near the tunnel. The three sites in the tunnel were located some 60 m from the entrance (site 1), in the middle of the tunnel (site 2) and some 60 m from the exit of the tunnel (site 3).

The following parameters were measured on the tunnel locations:

- Particle mass concentration using a GRIMM monitor (an optical particle counter) and later on a TEOM monitor (typically minute averaging).
- LVS filter sampling system to monitor particle mass concentrations (EU reference system, normally 24 hours averaging time)
- NO_x concentration using an Airpointer (EU reference method)
- Air temperature and humidity
- Wind speed

Traffic flows were monitored using a Smart Eye Traffic Data Sensor. This sensor is able to distinguish light duty from heavy duty vehicles.

Monitoring strategy

In principle, the performance of the system could be monitored by switching the system on and off while monitoring the particle concentrations in the tunnel. The concentration in the tunnel is determined by the background concentrations, the emissions by traffic, the ventilation rate and by deposition to the walls (induced by the system). If the concentration in the tunnel was constant in periods that the system was switched, the determination of the effect of the system would be easy. The concentration rise coming from the entrance of the tunnel to the exit can then be compared during periods with the system off and on. The difference in the rise in concentration is then a measure of the effect of the system. If the increase in concentration is lowered when the system is switched on, the system is working well.

All the parameters mentioned above however, fluctuate significantly and cause the concentration in the tunnel to fluctuate as well. These fluctuations will increase the noise in the interpretation of the effect of the system. Systematic diurnal variations in parameters and correlation with the switching process may even lead to a strong bias in the interpretation. Therefore a different approach was chosen. It was attempted to switch the system on and off so quickly that conditions would not change significantly during the complete cycle of switching the system on and off. A switching time of 15 minutes was chosen and tested. Tests by BAM carried out in Phase 0 (testing phase) showed that the system was working much slower and this approach was abandoned. In Phase 1, a switching time of 100 minutes was chosen. In Phase 2, a switching time of 24 hours was chosen, allowing investigation of the effect of the system when it is switched on for longer periods.

Interpretation of the monitoring data

The increase in the concentrations of particles in the tunnel is influenced by the ventilation in the tunnel and the emission rate of particles by traffic in the tunnel. Emissions of particles (especially exhaust emissions) and emissions of NO_x are both proportional to traffic intensity. The influence of ventilation on the concentration of both NO_x and particles is equal. Consequently, the ratio of the increase in the concentration of particle concentration (ΔPM , the difference between PM at the tunnel sites 3 and 1) and the increase of NO_x (ΔNO_x) is equal to the ratio of their emissions. A change in the ratio $\Delta PM/\Delta NO_x$ when the system is switched, indicates an effect of the system. The reduction effect by the system is then defined as:

$$effect = \left(1 - \frac{average\left(\frac{\Delta PM}{\Delta NO_x}\right)_{on}}{average\left(\frac{\Delta PM}{\Delta NO_x}\right)_{off}} \right) * 100\%$$

By definition, the effect is expressed as the percentage of the PM emission in the tunnel that is removed. This definition is also used in other IPL studies, in which the primary goal was to assess the effect with respect to the contribution by road traffic.

A definition that would better represent the actual situation is to express the effect as the percentage of the total amount of particulate matter in the tunnel. This would allow taking into account the reduction of outside aerosol flowing into the tunnel. An estimation of the effect based on this definition will also be made. From the effect with respect to the emission in the tunnel, the effect with respect to the total amount of PM is derived, based on the mean ratio of the background concentration / (background+emission in the tunnel).

Quality assurance of measurements

- As outlined above, NO_x measurements in the tunnel were used to compensate for fluctuations in conditions other than the electrostatic system being switched on or off (ventilation rate and traffic emissions in the tunnel). The increase in NO_x concentrations in the tunnel during periods when the system was switched off did not significantly differ from the increase of these concentrations during periods that the system was on. These results indicate that NO_x is not sensitive to the electrostatic field induced by the system and therefore NO_x can indeed be used as a reference. This proved the validity of the approach in which the ratio of the increase in concentrations of NO_x and PM is used to determine the effect.
- The quality of the PM measurements by the GRIMM monitors was investigated by comparison of the monitors and by comparison with measurements taken by the LVS reference filter method. It turned out that the GRIMM monitors were not functioning properly and the quality of their data was unsatisfactory for the analysis. Their malfunctioning could be influenced by the effect of charged particles on pollution of the optical system or other artefacts. Not involving the GRIMM data in the analysis implies that no results were obtained for PM_{2.5}.
- Nearly two months after the start of the campaign, TEOM monitors were installed to measure PM₁₀. The quality of the PM₁₀ measurements by the TEOM monitors was also investigated by comparison with measurements taken by the LVS reference method (for further details see Uncertainty).

Uncertainty

- In view of the monitoring strategy (alternately switching the electrostatic concept on and off), uncertainties that normally affect the analysis, like between sampler uncertainty and systematic monitoring errors, do not play a role in this study. For the same monitors are used during alternating periods in which the system is switched on and off.
- If the measurements are influenced by the electrostatic concept, this influence may be mistaken for an effect of the electrostatic concept (either positive or negative). Therefore, it is of utmost importance to investigate this aspect. The following is concluded:
 - The comparison between TEOM and LVS indicates that the TEOM measurements may be influenced by the electrostatic concept. This influence could be as high as a few percent.
 - This indication (hypothesis) could not be confirmed or rejected because of the limited amount of data and its poor quality.
 - Based on the present dataset it is not possible to either correct for the influence or estimate the uncertainty it introduces. Therefore, in the results and their uncertainty presented in this study, this influence is not taken into account.
 - Further research is necessary to assess the effect of the influence the electrostatic concept may have on the measurements.
- As a consequence, the uncertainty analysis is only based on the random measurement errors (noise).

Effectiveness of the electrostatic concept

- During Phase 1 (with a switching interval of 100 minutes), the reduction effect of the electrostatic concept on the PM₁₀ mass concentration is 11% +/- 5% (95% percentile) with respect to the amount of PM₁₀ that is emitted in the tunnel, meaning that the reduction effect with respect to the total amount of PM₁₀ in the tunnel is 7 +/- 3%.
- During Phase 2 (with a switching interval of 24 hours), the reduction effect of the electrostatic concept on the PM₁₀ mass concentration is 15% +/- 6% (95% percentile) with respect to the amount of PM₁₀ that is emitted in the tunnel, meaning that the reduction effect with respect to the total amount of PM₁₀ in the tunnel is 9 +/- 4%.
- Although this aspect could not be thoroughly investigated, the reduction effect seems to depend on the relative humidity (RH) of the tunnel air. Higher RH values coincide with a higher reduction percentage. However, the relative humidity is correlated with other parameters like traffic intensity (and as a consequence with the concentration increase of PM in the tunnel). Therefore, it is not certain that the relationship found is indeed caused by the relative humidity.
- The difference in the average reduction between Phase 1 and Phase 2 can not be explained by the relative humidity of the tunnel air, since it was dryer during Phase 2. It could be an indication that the electrostatic concept is more effective when switched on for longer periods.
- The effectiveness on the PM_{2.5} mass concentration could not be established during this study because of lack of sufficiently good monitoring data.

Applicability

- The results presented in this study are valid for the Thomassentunnel in the summer of 2009. They are not representative of the yearly mean situation, nor are they by any means applicable to other tunnels. Parameters like traffic intensity and composition, configuration of the tunnel and air humidity could influence the reduction.
- Indicative model calculations show that application of the electrostatic concept in the Thomassentunnel (with a yearly averaged reduction of 10 to 20%) would lead to a decrease of the number of days at which the 24h-limit concentration is exceeded by 1 to 2 in 2008. Near tunnels with a higher traffic intensity and background concentration (Beneluxtunnel, Coentunnel en Schipholtunnel), the decrease would be on average 4 days at 10% reduction and 7-11 days at 20% reduction.
- For illustration, the effect on the number of exceedance days is also calculated for reduction percentages of 40-60%. These percentages are referred to by BAM/TUD based on preliminary estimations of the possibilities for optimization. The number of days at which the 24h-limit concentration is exceeded near the Thomassentunnel in 2008 would decrease with 4-6 days. Near tunnels with a higher traffic intensity and background concentration (Beneluxtunnel, Coentunnel en Schipholtunnel), the decrease would be 15-22 days at 40% and 22-32 days at 60%.

Recommendations

- The present study shows that the electrostatic concept has indeed potential to reduce the concentration of PM₁₀ in tunnels. However, more knowledge about important parts of the process is needed to optimize the concept. It is essential to gain more knowledge about the inducement of the electrostatic field, the change in the state of charge of the particles, the transport of the charged particles through the air to the screens etc. Without enough knowledge about these processes, it is hard to optimise the concept.

- The effectiveness of the electrostatic concept seems sensitive to the relative air humidity in the tunnel. However, the relative humidity is correlated with other parameters like traffic intensity (and as a consequence with the concentration increase of PM in the tunnel). Therefore, it is not certain that the relationship found is indeed caused by the relative humidity. It is recommended to give this aspect further investigation.
- To get a representative estimate of the effectiveness, it is necessary to carry out measurements during different seasons.
- The method applied in this study to analyze the effect of the electrostatic concept, seems to be working well in general and to lead to small uncertainties. It is recommended to investigate whether further improvements can be made to the method during future tests.
- In order to assess the effect of the influence the electrostatic concept may have on the measurements, in a following study it is recommended to enlarge the period in which simultaneous measurements of PM with TEOM and LVS are carried out.

Samenvatting

De BAM en TU Delft (TUD) hebben gezamenlijk een fijnstofreductiesysteem in tunnels ontworpen, het zogenaamde elektrostatisch concept. Basis van het systeem is een stelsel van stalen draden waarop een elektrische spanning wordt gezet. De metalen draden worden aan een zijwand van de tunnel aangebracht. Het elektrisch veld dat daarvan het gevolg is zorgt er voor dat fijnstofdeeltjes in de lucht in de tunnel worden geladen. Aan de andere kant van de tunnel worden gearde metalen schermen geplaatst (passieve rekken). Als de geladen deeltjes door turbulente luchtbewegingen in de buurt komen van de gearde metalen schermen worden ze afgevangen. Metingen in een proefopstelling op kleine schaal waarbij een tunnel is gesimuleerd lieten zien dat de massaconcentratie van PM₁₀ en PM_{2.5} door het systeem met ca. 15% wordt gereduceerd. De gemiddelde reductie van de deeltjesaantallen concentratie bleek in hetzelfde experiment bijna 50%.

In het kader van het Innovatieprogramma luchtkwaliteit (IPL) is de werkzaamheid van het elektrostatisch concept in een praktijksituatie in de Thomassentunnel (A15, Rijnmond) beproefd. In de tunnel is dit concept in de zomer van 2009 in een bepaalde configuratie van elementen geïnstalleerd. Het doel van het onderzoek is om vast te stellen of er een significante reductie plaatsvindt van de concentratie van PM₁₀ en PM_{2.5} in de tunnel bij de door BAM/TUD gekozen configuratie van het elektrostatisch concept. Primair is de doelstelling afgebakend op de Thomassentunnel in de zomer van 2009. Een secundaire doelstelling is om begrip te krijgen van de omstandigheden die een rol spelen met als resultaat een generalisering van het effect.

Metingen in de Thomassentunnel

De Thomassentunnel is een 1100 m lange tunnel in de A15 met west-oost oriëntatie. De tunnel bestaat uit twee tunnelbuizen. De rechterbuis heeft drie rijstroken, de linkerbuis heeft twee rijstroken en een vluchtstrook. De metingen zijn uitgevoerd in de linker tunnelbuis (die loopt van oost naar west). De tunnelbuis is ongeveer 5 m hoog en bijna 15 m breed. Op een gemiddelde weekdag rijden gemiddeld 23.000 voertuigen door de tunnelbuis. Het aandeel zwaar vrachtverkeer is 14%, het aandeel middelzwaar vrachtverkeer 12%. Er vindt onder normale omstandigheden geen geforceerde ventilatie plaats. De luchtstroming in de tunnel wordt grotendeels bepaald door het wegverkeer.

Tijdens de proef heeft M+P Raadgevende Ingenieurs metingen op vier locaties uitgevoerd (drie binnenin de tunnel en een in de buitenlucht). In de buitenlucht is de apparatuur op het dak nabij de westelijke in/uitgang geplaatst om informatie te verkrijgen van de achtergrond omstandigheden. In de tunnel liggen de meetlocaties op ca 60 m na de tunnelingang (meetpunt 1), in het midden (meetpunt 2) en op ca 60 meter voor de tunneluitgang (meetpunt 3). De volgende parameters zijn op de locaties in de tunnel gemeten:

- Massaconcentratie van fijn stof met een GRIMM monitor (optische deeltjesteller) en later met een TEOM monitor (minuutgemiddelde waarden)
- Massaconcentratie van fijn stof met een LVS filtermonstering systeem (EU referentiemethode voor 24 uurgemiddelde concentraties)
- NO_x concentratie met een Airpointer (op basis van EU referentiemethode)
- Luchttemperatuur en -vochtigheid
- Windsnelheid

Verkeersintensiteiten en -snelheden zijn gemeten met een Smart Eye Traffic Data Sensor. Daarmee kan onderscheid gemaakt worden tussen personen- en vrachtwagens.

Meetstrategie

In principe zou een uitspraak over de werking van het systeem gebaseerd kunnen zijn op metingen van de concentratietoename van fijn stof in de tunnel bij een aangeschakeld systeem en bij een uitgeschakeld systeem. Als de toename lager is bij een aangeschakeld systeem duidt dat erop dat het systeem werkt. Het concentratieverschil wordt echter ook beïnvloed door de doorstromingsnelheid van lucht door de tunnel en de emissie van het verkeer in de buis. Deze methode werkt dan ook alleen wanneer de omstandigheden waarbij de metingen met een aangeschakeld systeem worden uitgevoerd precies gelijk zijn aan de omstandigheden waarbij het systeem uitgeschakeld is.

De verkeersintensiteit en de bijdrage van de achtergrond variëren echter sterk en de veranderingen leiden tot grote fluctuaties van concentraties in de tunnel. Door dit effect zullen simpele vergelijkingen tussen aan en uit veel ruis vertonen. Systematische variaties binnen een dag en correlatie met de afwisseling van intervallen waarin het systeem aan en uitgeschakeld is, kunnen tot fouten in de interpretatie leiden. Daarom is er in Fase 0 getest of het systeem zodanig snel kon worden aan en uitgeschakeld (om de 15 minuten), dat de omstandigheden niet zouden variëren. In de praktijk bleek uit onderzoek van BAM echter dat het systeem in deze tunnel veel trager reageert dan oorspronkelijk werd gedacht. Daarom is voor een andere aanpak gekozen. In Fase 1 is gewerkt met een schakelinterval van 100 minuten. In Fase 2 is gekozen voor 24 uur, zodat de werking van het systeem bij langdurigere toepassing onderzocht kon worden.

Interpretatie van meetdata

Om het effect van variërende parameters mee te nemen in de analyse is gebruik gemaakt van de metingen van NO_x . De toename van de concentratie van fijn stof en NO_x in de tunnel wordt beïnvloed door de emissies en de verspreiding (ventilatie). Emissies van fijn stof (met name de uitlaatemissies) en NO_x zijn beide evenredig aan de verkeersintensiteit. Ook de verspreiding is voor fijn stof en NO_x hetzelfde. Als gevolg is de verhouding tussen de concentratietoename van fijn stof (ΔPM , het verschil tussen PM op meetpunten 3 en 1) en die van NO_x (ΔNO_x) gelijk aan de verhouding tussen hun emissies. Een verandering van de verhouding $\Delta\text{PM}/\Delta\text{NO}_x$ als het systeem aangeschakeld wordt, is een indicatie van het effect van het systeem. Het reductiepercentage van het systeem is dan gedefinieerd als:

$$\text{effect} = \left(1 - \frac{\text{gemiddelde} \left(\frac{\Delta\text{PM}}{\Delta\text{NO}_x} \right)_{\text{aan}}}{\text{gemiddelde} \left(\frac{\Delta\text{PM}}{\Delta\text{NO}_x} \right)_{\text{uit}}} \right) * 100\%$$

Door deze definitie wordt het effect uitgedrukt als het percentage van de fijnstofemissie in de tunnel. Deze definitie is gelijk aan die welke bij andere IPL studies is gebruikt, waarbij primair gekeken is naar het effect op de wegbijdrage. Een definitie die meer recht doet aan de feitelijke situatie is om het effect als percentage van de hoeveelheid fijn stof in de tunnel uit te drukken. Dan wordt ook rekening gehouden met de afvangst van aerosol dat als achtergrondconcentratie de tunnel instroomt. Uit het effect ten opzichte van de emissie in de tunnel wordt daarom ook het

effect ten opzichte van de totale hoeveelheid fijn stof bepaald op basis van de gemiddelde verhouding achtergrond/(achtergrond+emissie in de tunnel).

Kwaliteit van de metingen

- De NO_x metingen zijn gebruikt om te corrigeren voor fluctuaties in omstandigheden anders dan het aan- en uitschakelen van het systeem (de doorstromingsnelheid van lucht door de tunnel en de emissie van het verkeer in de tunnelbuis). Uit de metingen blijkt dat er geen significant verschil is in de toename van de NO_x concentratie in de tunnel tijdens perioden met een aangeschakeld systeem en perioden met een uitgeschakeld systeem. NO_x is dus een voor het elektrostatisch concept ongevoelige component en dus als referentiestof bruikbaar. Dit ondersteunt de gekozen aanpak.
- De kwaliteit van de metingen met de GRIMM fijnstofmonitoren is via onderlinge vergelijkingen van de monitoren en vergelijkingen van de concentratie van PM₁₀ met LVS metingen onderzocht. De kwaliteit bleek onvoldoende om de analyse op de GRIMM data te baseren. Het niet goed functioneren van de GRIMM monitoren kan een gevolg zijn van beïnvloeding door het elektrostatisch concept (geladen deeltjes) of er kunnen andere artefacten een rol spelen.
- De kwaliteit van de PM₁₀ metingen met de TEOM monitoren, die halverwege de praktijkproef zijn geïnstalleerd, is op basis van vergelijkingen met LVS metingen onderzocht (zie verder onder Onzekerheid).

Onzekerheid

- Gezien de meetstrategie (waarbij het elektrostatisch concept afwisselend heeft aan- en uitgestaan) spelen onzekerheden als between sampler onzekerheid en systematische fouten in de meetapparatuur in deze studie geen rol. Er wordt immers afwisselend bij een werkend en niet werkend systeem met dezelfde monitoren gemeten.
- Systematische beïnvloeding van de metingen door het elektrostatisch concept zou ten onrechte worden geïnterpreteerd als een effect (of juist een negatief effect afhankelijk van de richting van de beïnvloeding). Het is daarom van het grootste belang om dit aspect goed in kaart te brengen. Geconcludeerd wordt:
 - De vergelijking tussen de TEOM en LVS geeft een indicatie dat de metingen met de TEOM beïnvloed kunnen zijn door het elektrostatisch concept. Het kan daarbij gaan om beïnvloeding ter grootte van enkele procentpunten.
 - Door het beperkte aantal metingen en de kwaliteit daarvan kan deze indicatie (hypothese) bevestigd noch verworpen worden.
 - Het is op basis van de huidige meetdata niet mogelijk om tot een correctie dan wel betrouwbare schatting van de onzekerheid als gevolg van deze beïnvloeding te komen. In de in deze studie gepresenteerde reductiepercentages en de bijbehorende onzekerheid is dus vooralsnog geen rekening gehouden met deze beïnvloeding.
 - Nader onderzoek is nodig om het effect van eventuele beïnvloeding in kaart te brengen.
- Als gevolg van bovenstaande is in de onzekerheidsanalyse alleen rekening gehouden met de willekeurige fouten (ruis) in de gemeten waarden.

Werking van het elektrostatisch concept tijdens de praktijkproef

- Tijdens Fase 1 van de praktijkproef (met een schakelinterval van 100 minuten) is het gemeten reductie-effect van het elektrostatisch concept t.a.v. PM_{10} gemiddeld 11 +/- 5% (95 percentiel) ten opzichte van de in de tunnel geëmitteerde hoeveelheid PM_{10} , waaruit volgt dat het reductie-effect ten opzichte van de totale hoeveelheid PM_{10} in de tunnel 7 +/- 3% is.
- Tijdens Fase 2 van de praktijkproef (met een schakelinterval van 24 uur) is het gemeten reductie-effect van het elektrostatisch concept t.a.v. PM_{10} gemiddeld 15 +/- 6% (95 percentiel) ten opzichte van de in de tunnel geëmitteerde hoeveelheid PM_{10} , waaruit volgt dat het reductie-effect ten opzichte van de totale hoeveelheid PM_{10} in de tunnel 9 +/- 4% is.
- Hoewel dit aspect niet uitputtend kon worden onderzocht lijkt de werking van het elektrostatisch concept gevoelig voor de relatieve luchtvochtigheid, waarbij een hogere luchtvochtigheid in de tunnel een gunstig effect heeft op het reductiepercentage. De relatieve luchtvochtigheid fluctueert echter samen met een aantal andere belangrijke parameters zoals de verkeersintensiteit en daarmee de concentratietoename in de tunnel. Het is daarom niet zeker dat het gevonden verband ook daadwerkelijk een gevolg is van de luchtvochtigheid.
- Het verschil in de gemiddelde reductie tussen Fase 1 en Fase 2 kan niet verklaard worden door de luchtvochtigheid, omdat deze tijdens Fase 1 gemiddeld gezien hoger was. Dit kan een aanwijzing zijn dat het systeem bij langdurige toepassing effectiever is dan bij kortstondige toepassing.
- De werking van het elektrostatisch concept t.a.v. $PM_{2.5}$ kon in deze studie niet vastgesteld worden vanwege het ontbreken van betrouwbare meetdata.

Toepasbaarheid

- De resultaten van deze studie gelden voor de Thomassentunnel in de zomer van 2009 bij de gekozen configuratie en zijn niet representatief voor de jaargemiddelde situatie en niet zonder meer toepasbaar op andere tunnels. Parameters zoals de verkeersintensiteit en samenstelling, tunnelconfiguratie en luchtvochtigheid kunnen van invloed zijn op het reductiepercentage.
- Indicatieve berekeningen laten zien dat de inzet van het elektrostatisch concept in de Thomassentunnel (met een jaargemiddelde effectiviteit van 10 tot 20 %) zou leiden tot een verlaging van het aantal overschrijdingsdagen met 1-2 dagen in 2008. Bij tunnels met een hogere verkeersintensiteit en achtergrondconcentratie (Beneluxtunnel, Coentunnel en Schipholtunnel) is de verlaging bij 10% reductie gemiddeld 4 dagen en bij 20% 7-11 dagen.
- Ter illustratie is ook het effect berekend van reductiepercentages van 40 en 60%. Dergelijke reductiepercentages worden genoemd door BAM/TUD op basis van voorlopige schattingen van de mogelijkheden van optimalisatie. Het aantal overschrijdingsdagen bij de Thomassentunnel in 2008 zal volgens de berekeningen dan afnemen met 4-6 dagen. Bij tunnels met een hogere verkeersintensiteit en achtergrondconcentratie (Beneluxtunnel, Coentunnel en Schipholtunnel) zou dit bij 40% oplopen tot 15-22 dagen en bij 60% tot 22-32 dagen.

Aanbevelingen

- Het huidige onderzoek toont aan dat er potentie is voor het elektrostatisch concept om fijn stof in tunnels af te vangen. Meer kennis over belangrijke onderdelen van het gehele proces is nodig om het systeem te optimaliseren. Dit geldt bijvoorbeeld voor de instelling van het elektrostatisch veld, de verandering van de ladingstoestand van de deeltjes als gevolg van het veld, het transport van geladen deeltjes door de lucht naar het scherm enzovoort. Zonder voldoende kennis over deze processen is het moeilijk om tot optimalisatie te komen
- De werking van het systeem lijkt gevoelig voor de luchtvochtigheid. De relatieve luchtvochtigheid fluctueert echter samen met een aantal andere belangrijke parameters zoals

de verkeersintensiteit en daarmee de concentratietoename in de tunnel. Het is daarom niet zeker dat het gevonden verband met de luchtvochtigheid ook daadwerkelijk een gevolg is van de luchtvochtigheid. Het wordt aanbevolen om dit nader te onderzoeken.

- Om een representatieve schatting te krijgen van het effect van het systeem in een tunnel, moeten op verschillende momenten in het jaar metingen uitgevoerd worden.
- De in deze studie gekozen aanpak lijkt in grote lijnen goed te werken en te leiden tot relatief kleine onzekerheden. Het wordt aanbevolen om voor vergelijkbare proeven te onderzoeken of er verbeteringen in de aanpak mogelijk zijn.
- Om het effect van eventuele beïnvloeding van de metingen door het elektrostatisch concept in kaart te brengen, wordt aanbevolen om in een volgende meetcampagne de vergelijking tussen TEOM en LVS over een langere periode uit te voeren.

1 Inleiding

De BAM en TU Delft hebben gezamenlijk een fijnstofreductie systeem in tunnels ontworpen, het zogenaamde elektrostatisch concept. Basis van het systeem is een stelsel van stalen draden waarop een elektrische spanning wordt gezet. De metalen draden worden aan een zijwand van de tunnel aangebracht. Het elektrisch veld dat daarvan het gevolg is zorgt er voor dat fijnstofdeeltjes in de lucht in de tunnel worden geladen. Aan de andere kant van de tunnel worden gearde metalen schermen geplaatst (passieve rekken). Als de geladen deeltjes door turbulente luchtbewegingen in de buurt komen van de gearde metalen schermen worden ze afgevangen. Metingen in een proefopstelling op kleine schaal waarbij een tunnel is gesimuleerd lieten zien dat de massaconcentratie van PM_{10} en $PM_{2.5}$ door het systeem met ca. 15% wordt gereduceerd. De gemiddelde reductie van de deeltjesaantallen concentratie bleek in hetzelfde experiment bijna 50%.

In het kader van het Innovatieprogramma luchtkwaliteit (IPL) is de werkzaamheid van het elektrostatisch concept in een praktijksituatie in de Thomassentunnel (A15, Rijnmond) beproefd. In de tunnel is dit concept in de zomer van 2009 in een bepaalde configuratie van elementen geïnstalleerd. Het doel van het onderzoek is om vast te stellen of er een significante reductie plaatsvindt van de concentratie van PM_{10} en $PM_{2.5}$ in de tunnel bij de door BAM/TUD gekozen configuratie van het elektrostatisch concept. Primair is de doelstelling afgebakend op de Thomassentunnel in de zomer van 2009. Een secundaire doelstelling is om begrip te krijgen van de omstandigheden die een rol spelen met als resultaat een generalisering van het effect.

Tijdens de praktijkproeven heeft M+P metingen uitgevoerd van de concentraties van PM_{10} en $PM_{2.5}$ op drie plaatsen in de tunnel en op een locatie buiten de tunnel. Naarmate men verder de tunnel in komt neemt de concentratie van fijn stof door emissies door het verkeer toe. De verschillen in de concentratie aan de ingang en de uitgang van de tunnel zijn een maat voor de bijdrage van het wegverkeer aan de concentratie van fijn stof. Een werkend afvangstelsysteem in de tunnel zal er zo toe leiden dat de concentratie minder toeneemt dan bij een niet werkend systeem. Metingen van de toename van de fijnstofconcentratie in de tunnel met en zonder inschakeling van het systeem geven daarmee inzicht in de afvangst-efficiency van de methode. Omstandigheden als verkeer, meteorologie en ventilatie hebben ook invloed op de concentratie van fijn stof en zorgen voor extra ruis in de concentratie. In de meetstrategie en data-analyse wordt rekening gehouden met deze externe factoren.

2 Beschrijving van de tunnel en het elektrostatisch concept

2.1 Tunneleigenschappen

De Thomassentunnel loopt onder het Calandkanaal in de havens van Rotterdam en verbindt daarbij de A15 aan de oostkant met de N15 aan de westkant. De exacte situering is tussen km 36,4 en km 37,6 van de A15 bij Rozenburg.

De metingen worden uitgevoerd in de "linker" tunnelbuis, dat wil zeggen de buis waardoor het verkeer van Arnhem naar zee rijdt. Deze buis bestaat uit een tweebaans rijweg, waarover zowel personen- als vrachtverkeer rijdt. Op een gemiddelde weekdag rijden gemiddeld 23.000 voertuigen door de tunnelbuis. Het aandeel zwaar vrachtverkeer is 14%, het aandeel middelzwaar vrachtverkeer 12%. Tijdens de proef zijn ook verkeersstellingen gedaan, waaruit geconcludeerd kan worden dat de meetperiode qua verkeersintensiteit en aandeel vrachtverkeer representatief is voor de jaargemiddelde situatie (zie verder paragraaf 3.3).

De lengte van het overkapte deel van de tunnel is 1108 m. De breedte van de tunnelbuis is 14.45 m, terwijl de hoogte varieert tussen 4.5 en 5.4 m. Het totale hoogteverschil is 28.6 m. De hellingshoek van de tunnel is aan beide zijden gemiddeld ongeveer 1.9 graden. Op het steilste gedeelte is de hoek 2.9 graden. De horizontale kromming van de tunnel is beperkt.

De tunnel wordt op natuurlijke wijze geventileerd. De luchtstroom in de tunnel volgt de richting van het verkeer. Bij calamiteiten vindt geforceerde ventilatie plaats. Daarnaast wordt er met enige regelmaat proefgedraaid met de ventilatoren. Dit is tijdens de proef op dagen gebeurd die niet zijn geselecteerd voor de analyse. Bij westenwind ondervindt de uitgaande luchtstroom uit de linker tunnelbuis tegenwerking van de wind.

De eigenschappen van de tunnelbuis zijn samengevat in Tabel 1.

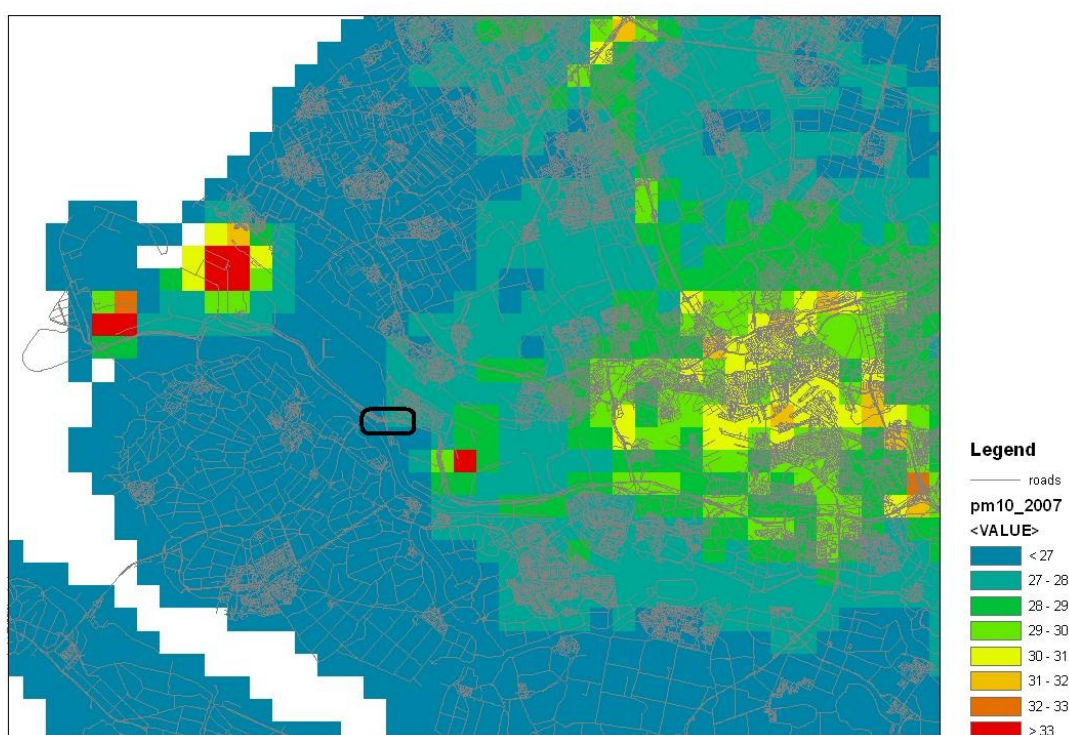
Tabel 1: Eigenschappen van de linker tunnelbuis

Lengte	1108 m
Breedte	14.45 m
Hoogte	5 m (varieert tussen 4.5 en 5.4 m)
Hellingshoek ingang	1.9 graden (gemiddeld)
Hellingshoek uitgang	1.9 graden (gemiddeld)
Hoogteverschil	28.6 m
Verkeer door tunnelbuis op gemiddelde weekdag	23.000 mvt/dag (2008)
Fractie zwaar+middelzwaar verkeer	26%
Ventilatie	Bij calamiteiten en eens in de maand proefdraaien.

2.2 Omgeving

Het gebied rondom de tunnel is met veel lokale bronnen en bebouwing voor de verspreiding van luchtverontreiniging complex te noemen. In de nabijheid bevinden zich industrie, vaarwegen met daarop drukke scheepvaart en verkeerswegen. Ter illustratie is in Figuur 1 de jaargemiddelde GCN¹ PM₁₀ concentratie voor 2007 gegeven.

Direct ten zuidoosten van de tunnel ligt het Botlekgebied. De GCN kaart geeft binnen een afstand van 3 km in het Botlekgebied een sterk verhoogde achtergrondconcentratie (39 µg/m³). Ook op ongeveer 10 km ten noordwesten van de tunnel, in de Europoort en Maasvlakte, komen verhoogde achtergrond concentraties van PM₁₀ voor. De GCN kaart laat zien dat deze verhoogde concentraties op jaargemiddelde basis geen invloed hebben op de achtergrondconcentratie bij de tunnelmonden. In 2007 was de GCN concentratie van PM₁₀ bij de tunnel ongeveer 27 µg/m³. In 2008 bleek deze 23 µg/m³.



Figuur 1: GCN kaart van PM₁₀ in 2007. De tunnel ligt in het zwart omlijnde gebied.

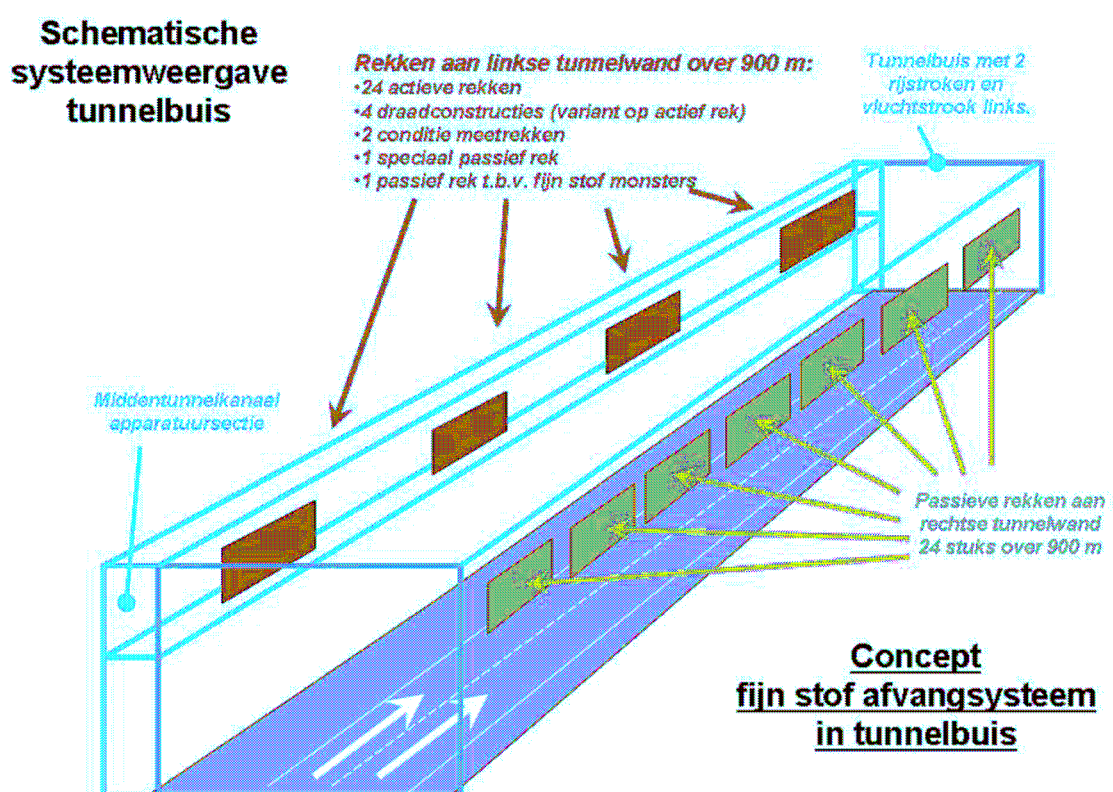
2.3 Elektrostatisch concept

Het elektrostatisch concept reduceert de fijn stof concentratie in de omgeving waar het is geïnstalleerd. Het systeem maakt gebruik van fijne stroomdraden (gemonteerd in zogenaamde actieve rekken), die naast de weg worden bevestigd. De draden worden met een positieve hoogspanningsbron verbonden, waardoor een elektrisch veld ontstaat. Door het elektrische veld rond de draad vindt corona ontlading plaats en ontstaan positieve ionen, die de fijn stof deeltjes één of meerdere positieve ladingen kunnen geven. De in de tunnel aanwezige turbulentie (mede veroorzaakt door het verkeer) zorgt voor een menging van het opgeladen fijn stof over de totale

¹ Het PBL produceert jaarlijks kaarten met grootschalige concentraties voor Nederland voor diverse luchtverontreinigende stoffen, waarvoor Europese regelgeving bestaat. De GCN kaarten geven een grootschalig beeld van de luchtkwaliteit in Nederland en betreffen zowel recente als toekomstige jaren (Velders et al., 2008)

doorsnede van de tunnel. Samen met de elektrische mobiliteit zorgt dit mechanisme ervoor dat de deeltjes neerslaan op gearde schermen die speciaal zijn gemonteerd om het fijn stof af te vangen (de zogenaamde passieve rekken). Als gevolg van de van der Waals krachten die optreden blijft het fijn stof aan deze rekken plakken.

In de tunnel is dit concept in de zomer van 2009 in een bepaalde configuratie van elementen geïnstalleerd. De hierboven beschreven actieve rekken zijn in de Thomassentunnel bevestigd aan de – voor de automobilist – linker zijde van de tunnel. Aan de overzijde zijn – eveneens aan de tunnelwand – de passieve rekken gemonteerd. In totaal zijn er in de Thomassentunnel 24 actieve rekken type 1 met elk 2 keer 6 m draad en 4 actieve rekken type 1a met elk 15 m enkele draad bevestigd. Tegenover de actieve rekken zijn 24 passieve rekken bevestigd. In Figuur 2 is deze configuratie schematisch weergegeven. In Bijlage A is een foto van de rekken in de tunnel opgenomen.



Figuur 2: Schematische weergave van de configuratie van het elektrostatisch concept in de Thomassentunnel (Bron: BAM, 2009)

Het totale vermogen van het elektrostatisch concept type 1 zoals geïnstalleerd in de Thomassentunnel is ongeveer 1 kW. Hierin zijn niet alleen alle actieve rekken meegenomen, maar ook alle toebehoren, zoals de zogenaamde communicatierekken, meetrekken en een server.

Als Bijlage H is een rapport van BAM/TUD opgenomen, waarin meer informatie over het elektrostatisch concept, zoals toegepast in de Thomassentunnel, wordt gegeven.

3 De meetstrategie

Voor aanvang is een meetplan opgesteld door TNO en geaccordeerd door de begeleidingscommissie van de proef. De meetstrategie is tijdens de proef op enkele punten gewijzigd als gevolg van voortschrijdend inzicht. Waar van toepassing worden deze wijzigingen in onderstaande paragrafen besproken.

3.1 Processen in de tunnel

De ruimtelijke concentratieverdeling van fijn stof (PM) in een tunnelbuis met verkeer wordt bepaald door een aantal processen, zoals de doorstroomsnelheid van lucht door de tunnel, de emissie van het verkeer in de buis, en de (eventuele) depositie van PM op de wand. Aangenomen wordt dat de depositie die gewoonlijk in de tunnel plaatsvindt niet beïnvloed wordt door het elektrostatisch concept.

De concentratie op een positie x in de tunnel (waarbij x = afstand tot ingang van de tunnel) wordt gegeven door :

$$C(x) = \left(C(0) - \frac{E}{A_2 * V_{dep}} \right) * \exp \frac{A_2 * V_{dep} * x}{A_1 * VV * L} + \frac{E}{A_2 * V_{dep}} \quad (\text{Eq.1})$$

waarbij:

- $C(0)$ en $C(x)$ de concentratie van PM voorstelt op de respectievelijke posities 0 en x in de tunnel;
- A_1 de oppervlakte is van de dwarsdoorsnede van de tunnelbuis;
- A_2 de oppervlakte is (tussen posities 0 en x) van de rekken waarop PM deponeert
- V_{dep} de depositiesnelheid is waarmee PM op de rekken deponeert;
- VV de ventilatievoud in de tunnelbuis is (aantal keer dat de tunnel ververst wordt per tijdsinterval);
- L de lengte van de tunnelbuis is;
- E de emissie van het verkeer in het segment tussen 0 en x is; deze is afhankelijk van de verkeersintensiteit, -samenstelling en snelheid.

Door het rijdende verkeer verplaatst de lucht zich in de tunnel van de ingang naar de uitgang. Dit heeft tot gevolg dat er, onder normale omstandigheden, een opbouw van de concentratie in de tunnel plaatsvindt van de ingang naar de uitgang. De verschillen in concentraties in de tunnel aan ingang en de uitgang zijn een maat voor de bijdrage van het wegverkeer aan de concentratie. Depositie als gevolg van een effectief werkend systeem leidt tot een minder grote stijging van de concentratie. Deze minder grote stijging wordt geïnterpreteerd als de werking van het systeem. Als er weinig verkeer rijdt (zoals 's nachts) en de heersende windrichting tegengesteld aan de rijrichting is, kan de verplaatsing van de lucht in de tunnel tegengesteld aan de rijrichting zijn. Dit leidt tot een slecht interpreteerbare situatie. In deze studie zijn die momenten niet op voorhand verwijderd uit de data-analyse, maar zullen bij de statistische toets als uitbijters geïdentificeerd kunnen worden. Ze worden dan niet meegenomen in de bepaling van het gemiddelde (zie hoofdstuk 5).

De effectiviteit van het systeem wordt dus onderzocht op basis van de concentratieverschillen tussen de ingang en de uitgang van de tunnel. In een situatie waarbij het concentratieverschil

3.3 Meetapparatuur

Tijdens de proef zijn verschillende meetsystemen voor fijn stof, NO_x, meteorologie en verkeer ingezet.

Fijn stof is gemeten met de volgende meetsystemen:

- GRIMM (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) op meetpunten 1, 2, 3 en 4.
- TEOM (PM₁₀) op meetpunten 1, 2, en 3. De TEOM's zijn in juli 2009 geplaatst in de tunnel, omdat de vergelijking tussen de GRIMM en LVS weinig vertrouwen gaf in de meetdata.
- LVS (PM₁₀) op meetpunten 1 en 3. Op meetpunt 2 is gedurende de campagne (op 25 augustus 2009) alsnog een LVS geplaatst.

NO_x is op meetpunten 1 en 3 gemeten met een Airpointer. Op meetpunt 2 is gedurende de campagne (op 25 augustus 2009) een Airpointer geplaatst.

In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op de kwaliteitsborging. Daarin wordt duidelijk dat op basis van tegenvallende meetprestaties van de GRIMM monitoren halverwege het project is besloten tot het plaatsen van TEOM monitoren. De GRIMM data zijn niet in de verdere analyse gebruikt. De meetapparatuur voor de concentraties van fijn stof en NO_x is in de tunnel in rekken achter barriërs geplaatst. De monsterneming vond plaats op een hoogte tussen de 2 en 3 meter.

Meteorologische condities zijn vastgelegd met een Vaisala weerstation (en via de meetapparatuur voor fijn stof en NO_x). De gemeten relatieve luchtvochtigheid wordt gebruikt in het onderzoek naar de invloed van de vochtigheid op de werking van het elektrostatisch concept. Uit de gemeten windrichting en -snelheid in de tunnel bleek dat deze sterk gecorreleerd is met de verkeersintensiteit. De winddata zijn verder niet in de analyse gebruikt.²

De verkeersintensiteit is gemeten met Smart Eye Traffic Data Sensors. Deze sensor maakt onderscheid tussen personenvoertuigen en vrachtverkeer. De metingen zijn steekproefsgewijs vergeleken met de jaargemiddelde verkeersintensiteiten (zie paragraaf 2.1). Daaruit bleek dat de metingen in de periode tot en met 10 juli 2009 wat betreft intensiteit en aandeel vrachtverkeer in de buurt liggen van de jaargemiddelde cijfers voor 2008. Rond 10 juli is de manier van opslaan van de data in de database gewijzigd. Om onbekende redenen bracht dit een sprong in de meetdata met zich mee. De gemeten verkeersintensiteiten zijn na 10 juli ongeveer tweemaal zo hoog. Omdat er in de analyse uiteindelijk geen gebruik gemaakt is van de verkeerstellingen (zie paragraaf 3.4), leidt dit niet tot problemen.

De ingezette meetapparatuur wordt in Bijlage A in meer detail beschreven. De meetdata is opgeslagen in de IPL-database (rapport IPL-7).

3.4 Beïnvloeding van de concentraties in de tunnel door andere factoren

Zoals in paragraaf 3.1 gesteld vormt het verschil in concentratie van fijn stof gemeten bij de ingang en de uitgang van de tunnel (ΔPM) het uitgangspunt van de analyse van de effectiviteit van het elektrostatisch concept. In principe zou een uitspraak over de werking van het systeem gebaseerd kunnen zijn op metingen van ΔPM bij een *aangeschakeld* systeem en bij een *uitgeschakeld* systeem. Het concentratieverschil wordt echter ook beïnvloed door de emissie van

² Windrichting zou een criterium kunnen zijn om intervallen waarin de lucht niet van de ingang naar de uitgang van de tunnel stroomt uit te sluiten van in de analyse. Er is echter voor gekozen om alle intervallen mee te nemen en op basis van een statistische toets achteraf de uitbijters te verwijderen (zie paragraaf 5.3).

het verkeer (E_{PM}) en een parameter die te maken heeft met het stromingspatroon in de tunnel (hier als ventilatievoud (VV) aangemerkt, hoewel deze hier niet de klassieke betekenis heeft). Wanneer deze twee factoren ook verschillen tussen de *aan* en de *uit* perioden, dan leidt dat tot een onjuiste interpretatie. In het vervolg van deze paragraaf wordt ingegaan op de methode die gebruikt is om de invloed van deze factoren te beperken.

Ruwweg is de relatie tussen de concentratie enerzijds en de emissie en ventilatie anderzijds:

$$\Delta C = \frac{E_{PM}}{VV} \quad (\text{Eq.3})$$

Het effect van het elektrostatisch concept (X) op basis van een meetperiode waarin het systeem *uit* stond en een meetperiode waarin het *aan* stond, wordt volgens Eq. 2 dan gegeven door:

$$1 - X = \left(\frac{\Delta C_{aan}}{\Delta C_{uit}} \right)_{PM} = \frac{\left(\frac{E_{PM,aan}}{VV_{aan}} - D \right)}{\left(\frac{E_{PM,uit}}{VV_{uit}} \right)} \quad (\text{Eq.4})$$

D is hierin een parameter die de verlaging van de concentratie als gevolg van de werking van het systeem weergeeft. Indien de emissie- en ventilatietermen in Eq. 4 voor beide meetperiodes hetzelfde zijn, kan het effect op deze manier bepaald worden. Als de termen echter verschillen wordt het berekende effect ook beïnvloed door variaties in emissie en ventilatie die niets met de werking van het systeem te maken hebben.

Doorgaans varieert de verkeersintensiteit (en daarmee de emissie en ventilatie) sterk wat leidt tot grote fluctuaties van concentraties in de tunnel. Door dit effect zullen simpele vergelijkingen tussen *aan* en *uit* veel ruis (willekeurige fluctuaties) vertonen. De werking van het systeem moet als het ware gedestilleerd worden uit de brij van willekeurige getallen. Zeker in een relatief korte meetperiode is dat bijzonder lastig.

Daarom is bij de opzet van het meetprogramma al getracht de invloed van deze ruis veroorzakende parameters te beperken.

Er zijn twee manieren om dit probleem aan te pakken:

1. het *aan* en *uit* schakelen zodanig snel laten plaatsvinden dat verwacht mag worden dat omstandigheden niet veel zullen veranderen, zodat er sprake is van vrijwel gelijke omstandigheden.

Voor deze werkwijze was in eerste instantie gekozen. In Fase 0 van het onderzoek (15 mei tot 15 juni 2009) is geëxperimenteerd met verschillende intervallen waarin het systeem werd *aan*- en *uit*geschakeld. Bovengenoemde parameters zoals de verkeersintensiteit, en achtergrondconcentratie veranderen op een tijdschaal van een uur. Bij een schakelinterval van 15 minuten wordt de invloed van deze parameters flink verlaagd. In eerste instantie is daarom voor een interval van 15 minuten gekozen. Dit zou zonder bezwaar kunnen omdat verwacht werd dat het systeem momentaan zou reageren en zijn werking zou hebben. Uit onderzoek van BAM/TUD in Fase 0 bleek echter dat het systeem in deze tunnel veel trager reageert dan oorspronkelijk werd gedacht.

2. het corrigeren voor variërende omstandigheden.

a. Om het effect van variërende parameters mee te nemen in de analyse kan gebruik gemaakt worden van modellen.

Modellen zouden het effect van emissie en ventilatie op de concentratie in rekening kunnen brengen en ervoor kunnen corrigeren. Het effect dat deze parameters op de concentratie hebben is echter niet met grote nauwkeurigheid vast te stellen. Er kunnen specifieke luchtstromingen zijn waardoor het verband tussen emissie en concentratie niet eenvoudig te voorspellen valt. De modeluitkomsten zijn daardoor kwetsbaar voor fouten en onzekerheden in deze parameters. Dit leidt er toe dat uitspraken over het effect van het systeem met een onbekende onzekerheid worden opgezadeld. Gezien de andere mogelijkheden voor interpretatie is hiervoor niet gekozen (zie onder b).

b. Om het effect van variërende parameters mee te nemen in de analyse kan gebruik gemaakt worden van de metingen van NO_x .

Ook voor NO_x is verkeer in de tunnel een emissiebron. Het mag verwacht worden dat het verband tussen emissie en concentratie, hoewel niet altijd eenvoudig te voorspellen, gelijk is voor stoffen met dezelfde bron. Gesteld dat er een lineair verband is tussen de emissie van NO_x en PM^3 , dan:

$$E_{NO_x} = yE_{PM} \quad (\text{Eq.5})$$

Voor NO_x geldt dan:

$$\left(\frac{\Delta C_{aan}}{\Delta C_{uit}} \right)_{NO_x} = \frac{\left(\frac{E_{NO_x,aan}}{VV_{aan}} \right)}{\left(\frac{E_{NO_x,uit}}{VV_{uit}} \right)} = \frac{\left(\frac{yE_{PM,aan}}{VV_{aan}} \right)}{\left(\frac{yE_{PM,uit}}{VV_{uit}} \right)} = \frac{\left(\frac{E_{PM,aan}}{VV_{aan}} \right)}{\left(\frac{E_{PM,uit}}{VV_{uit}} \right)} \quad (\text{Eq.6})$$

Combinatie met Eq.4 geeft:

$$\left(\frac{\Delta C_{aan}}{\Delta C_{uit}} \right)_{PM} = \left(\frac{\Delta C_{aan}}{\Delta C_{uit}} \right)_{NO_x} - D / \left(\frac{E_{PM,uit}}{VV_{uit}} \right) \quad (\text{Eq.7})$$

Omschrijven en combinatie met Eq.6 leidt tot:

$$\frac{\left(\frac{\Delta C_{aan,PM}}{\Delta C_{aan,NO_x}} \right)}{\left(\frac{\Delta C_{uit,PM}}{\Delta C_{uit,NO_x}} \right)} = 1 - \frac{D}{\left(\frac{E_{PM,aan}}{VV_{aan}} \right)} \quad (\text{Eq.8})$$

³ Deze aanname wordt aan het eind van de paragraaf besproken.

En dus:

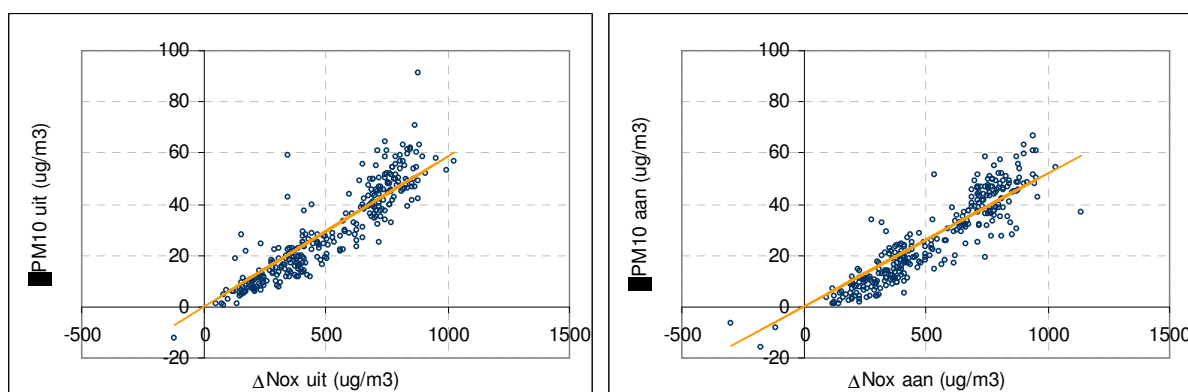
$$1 - \frac{\left(\frac{\Delta C_{aan,PM}}{\Delta C_{aan,NOx}} \right)}{\left(\frac{\Delta C_{uit,PM}}{\Delta C_{uit,NOx}} \right)} = \frac{D}{\Delta C_{aan,PM}} \quad (\text{Eq.9})$$

In Eq.9 is te zien hoe de verliesterm D veroorzaakt door de werking van het systeem vergeleken wordt met de concentratie toename tijdens de periode dat het systeem heeft gewerkt ($\Delta C_{aan,PM}$). Het probleem van fluctuaties in de emissietermen en de ventilatie is hiermee redelijk geëlimineerd.

Het verschil tussen de verhouding $\Delta PM/\Delta NO_x$ tijdens aan en uit perioden geeft dus inzicht in de werking van het systeem. Is de verhouding $\Delta PM/\Delta NO_x$ bij systeem aan anders dan bij uit dan is dat toe te schrijven aan het effect van het systeem.

Voor deze aanpak, toegepast in Fase 1 en 2 van de proef, gelden de volgende aannames:

- De emissie, verspreiding en depositie van NO_x is niet gevoelig voor het elektrostatisch concept. Uit de analyse van het verschil tussen ΔNO_x bij een aangeschakeld en uitgeschakeld systeem blijkt dat de verwachting klopt (zie hoofdstuk 4). Er is geen significant verschil in de toename van de concentratie van NO_x in de tunnel tijdens perioden met een aangeschakeld systeem en perioden met een uitgeschakeld systeem.
- Er is een vaste relatie tussen de emissie van NO_x en die van fijn stof gedurende de twee meetperioden. Figuur 4 laat de verhouding tussen de emissie van NO_x en PM in de tunnel zien gedurende Fase 2 (op basis van de concentratietoename in de tunnel). Daaruit blijkt dat een lineair verband tussen de emissies van NO_x en PM_{10} een redelijke aanname is bij een uitgeschakeld systeem. Het is overigens opvallend dat de PM_{10} emissie sterker toeneemt bij grotere emissies van NO_x , maar dat is zowel bij een aangeschakeld als uitgeschakeld systeem zichtbaar. Als de verhouding tussen de emissies van NO_x en PM_{10} fluctueert dan zal dat dus ruis toevoegen maar het gemiddelde niet aantasten.
- Naast uitlaatemissies kent fijn stof ook emissies die samenhangen met slijtage van banden en remmen en opwaaiend stof. Deze emissies kunnen een aanzienlijk deel van de totale fijnstofemissie uitmaken. De verspreiding daarvan wordt verondersteld gelijk te zijn aan die van de uitlaatemissies. Het lineaire verband uit Figuur 4 onderbouwt deze aanname. Als de verspreiding namelijk sterk zou verschillen, zou dat moeten leiden tot een grotere spreiding of zelfs helemaal geen eenduidig verband.



Figuur 4: De gemeten concentratietoename ($\mu g/m^3$) van PM_{10} tegen die van NO_x tijdens de intervallen in Fase 2 waarop het systeem uit stond. Links: bij uitgeschakeld systeem. Rechts: bij aangeschakeld systeem. De lijnen dienen slechts ter illustratie en zijn gefit door de oorsprong.

3.5 Fasering

De meetcampagne bestond uit de volgende fasen (Tabel 2):

Tabel 2: Fasering op basis van schakelinterval

Fase	Periode	Schakelinterval
0	15 mei tot 15 juni 2009	15 minuten
1	15 juni tot 19 augustus 2009	100 minuten
2	19 augustus tot 21 september 2009	24 uur

- Fase 0:

In deze fase is geëxperimenteerd met verschillende schakelintervallen van het elektrostatisch concept. Er is uiteindelijk voor 15 minuten gekozen. De metingen zijn niet gebruikt voor de analyse van het effect van het systeem, omdat bleek dat het systeem in deze tunnel veel trager reageert (zie paragraaf 3.4)

- Fase 1:

In deze fase is gewerkt met een schakelinterval van 100 minuten. Dit interval is gekozen op basis van de resultaten van onderzoek door BAM/TUD naar de snelheid waarmee het systeem in de tunnel reageert op het *aan* en *uitschakelen*. De eerste 15 minuten in elk interval worden buiten beschouwing gelaten om opstart- en naijleffecten te minimaliseren.

- Fase 2:

In deze fase is gewerkt met een schakelinterval van 24 uur. Deze aanpassing had meerdere redenen. Ten eerste is het zinvol om het systeem bij langdurigere toepassing te onderzoeken. Daarnaast kan op deze tijdschaal een betere vergelijking gemaakt worden tussen de metingen van de concentratie van PM₁₀ met de TEOM en de referentiemetingen van PM₁₀ (LVS). Dat maakt het mogelijk de beïnvloeding van de meetsystemen door het elektrostatisch concept te onderzoeken (zie hoofdstuk 4).

4 Kwaliteitsborging

4.1 Inleiding

De kwaliteitsborging van de metingen in de Thomassentunnel is voor een belangrijk gedeelte uitgevoerd volgens standaardprocedures. De metingen zijn uitgevoerd door M+P. Zij hebben interne standaardprocedures gevolgd, waar nodig in overeenstemming met EN-NEN normen. Voor, tijdens en na de praktijkproef zijn verschillende acties uitgevoerd, gericht op het bepalen en borgen van de kwaliteit van de metingen. Dit betreft zowel de onderlinge vergelijkbaarheid van hetzelfde type apparaten (de zogenaamde *between sampler* vergelijkbaarheid) als de vergelijkbaarheid tussen meetsystemen.

Hieronder wordt besproken welke onzekerheden er zijn en in welke mate ze een rol spelen bij de onzekerheid in de analyse van de werking van het elektrostatisch concept. Het is belangrijk zich te realiseren dat de in deze studie gebruikte methodiek (het afwisselend inzetten van de maatregel in de tijd) sterk verschilt van gebruikelijke methoden waarbij tegelijkertijd een referentie- en een maatregelsituatie wordt bemeaten. Door deze werkwijze vervallen foutenbronnen die bij de gebruikelijke methoden een rol spelen.

- De *between sampler* onzekerheid

Deze is belangrijk wanneer verschillende apparaten afzonderlijk worden ingezet en het verschil tussen de door deze apparaten gemeten concentraties wordt gebruikt om een effect vast te stellen (zoals in de bovengenoemde gebruikelijke methodiek). In principe zouden dergelijke apparaten precies gelijk moeten reageren zodat een optredend verschil kan worden toegeschreven aan het effect. Onafhankelijk van de werking van het systeem zal echter tussen concentraties gemeten met twee apparaten altijd een (klein) verschil zitten. Dat wordt uitgedrukt als de *between sampler* onzekerheid. Om gedetecteerd te kunnen worden moeten verschillen dus groter zijn dan de *between sampler* onzekerheid. In deze studie wordt weliswaar met verschillende monitoren gewerkt om de concentratietoename in de tunnel te bepalen, maar deze wordt niet vergeleken met een gelijktijdig elders gemeten concentratietoename. Het effect wordt bepaald door de concentratietoenames gemeten met dezelfde monitoren maar op verschillende momenten te vergelijken. De *between sampler* onzekerheid draagt daarom in deze studie niet bij aan de onzekerheid, tenzij de onzekerheid in de orde van grootte van de gemeten concentratietoename ligt. Dit was een van de problemen bij de GRIMM monitoren (zie Bijlage B). Daarom is besloten om de analyse uit te voeren op basis van de metingen met de TEOM's. Informatie over de *between sampler* vergelijkbaarheid van de meetsystemen is gegeven in Bijlage C.

- Willekeurige (toevallige) fouten

Dit houdt in dat een apparaat nu eens een te lage dan weer een te hoge concentratie meet zonder dat daarvoor een oorzaak aan te geven is. Bij metingen van bijvoorbeeld een concentratie leidt deze ruis niet tot een ander gemiddelde. Wel neemt de onzekerheid in het gemiddelde toe. Aangezien er wordt gewerkt met een groot aantal intervallen, zal de willekeurige fout voor een belangrijk deel uitgemiddeld worden. De resterende willekeurige fout volgt uit de spreiding in de gemiddelden (zie hoofdstuk 5).

- Systematische fouten

- Apparaten kunnen standaard een te lage of te hoge concentratie meten. Voor automatische monitoren voor fijn stof speelt dat een rol. Deze meten vaak een te lage concentratie door verdamping van vluchtige componenten. In dit geval wordt het relatieve effect vastgesteld. Dit wordt gebaseerd op metingen met dezelfde monitoren maar op verschillende momenten. Deze onzekerheid speelt in de analyse daardoor geen rol.

- Apparaten kunnen een systematisch verloop (drift) hebben. Omdat het systeem afwisselend *aan* en *uit* wordt geschakeld werkt de invloed in beide situaties min of meer hetzelfde door, zodat dit alleen ruis toevoegt (zie willekeurige fout).
- Een werkend elektrostatisch concept zou de meetapparatuur kunnen verstoren. Er treden dan systematische afwijkingen op in de meetapparatuur bij een aangeschakeld systeem. In paragraaf 4.2 wordt het onderzoek naar de mogelijke beïnvloeding van de metingen door de werking van het elektrostatisch concept beschreven.

4.2 Onderzoek naar beïnvloeding van de metingen door het elektrostatisch concept

Wanneer een monitor sterk reageert op het aanschakelen van het systeem zouden ernstige fouten in de analyse kunnen optreden. De reactie van de monitor kan dan ten onrechte worden aangezien voor een effect (monitor wijst lager aan bij een aangeschakeld systeem) of het effect kan worden gemist (monitor wijst hoger aan bij een aangeschakeld systeem). Beide situaties zijn ernstig en dienen te worden vermeden.

De analyse van de werking van het systeem berust op metingen van NO_x en van PM₁₀. Het is belangrijk dat de voor deze stoffen gebruikte monitoren niet reageren op het inschakelen van het elektrostatisch concept.

Er zijn voor zover bekend geen aanwijzingen dat de NO_x monitoren beïnvloed worden door een elektrostatisch veld. Voor de metingen met de TEOM zou beïnvloeding eerder aan de orde kunnen zijn, omdat geladen deeltjes effect zouden kunnen hebben op het oscillerend filter. Voor de LVS systemen is er geen aanleiding om beïnvloeding te verwachten. Er is dan ook aangenomen dat de LVS metingen niet beïnvloed zijn door het elektrostatisch concept.

Vooralsnog wordt aangenomen dat zowel de TEOM's als de NO_x monitoren niet reageren op het systeem. Deze nul hypothesen zijn getoetst. In Bijlage D wordt deze toetsing besproken. Daaruit blijkt dat de NO_x monitoren niet reageren op het systeem. De verschillen tussen metingen met het systeem *aan* of *uit* zijn kleiner dan enkele procenten en zeker niet significant. Met deze foutenbron wordt daarom verder geen rekening gehouden.

Voor de TEOM's is de vergelijking uiteraard niet op dezelfde manier mogelijk. Beïnvloeding is onderzocht door de fijnstofconcentraties gemeten met de TEOM in zowel *aan* als *uit* perioden te vergelijken met de concentraties gemeten met de LVS. Aangenomen wordt dat beïnvloeding van de TEOM's door het systeem naar voren zou komen uit een verschil in de relatie tussen TEOM en LVS bij *aan* en *uit* perioden. De metingen met de TEOM vertonen van zichzelf al ruis en de vergelijking met de LVS vertoont daardoor doorgaans nog meer ruis. De ruis bemoeilijkt samen met het geringe aantal meetdagen de interpretatie.

In Bijlage D wordt ingegaan op de metingen uitgevoerd met de TEOM en de LVS in de *aan* en *uit* perioden. Daaruit blijkt dat de TEOM op meetpunt 3 bij een werkend systeem gemiddeld 3 % lager zou kunnen aangeven dan bij een niet werkend systeem. De significantie van deze verschillen hangt sterk samen met het al dan niet meenemen van uitbijters. Duidelijk is dat het aantal metingen te beperkt is voor een goede analyse van deze onzekerheid in de vaststelling van het effect.

Op basis van de discussie in Bijlage D wordt het volgende geconcludeerd:

- Systematische beïnvloeding van de metingen door het elektrostatisch concept zou ten onrechte worden geïnterpreteerd als een effect (of juist een negatief effect afhankelijk van de richting van de beïnvloeding). Het is daarom van het grootste belang om dit aspect goed in kaart te brengen.

- De vergelijking tussen de TEOM en LVS geeft een indicatie dat de metingen met de TEOM beïnvloed kunnen zijn door het elektrostatisch concept. Het kan daarbij gaan om beïnvloeding ter grootte van enkele procenten.
- Door het beperkte aantal metingen en de kwaliteit daarvan kan deze indicatie (hypothese) bevestigd noch verworpen worden.
- Het is op basis van de huidige meetdata niet mogelijk om tot een correctie dan wel betrouwbare schatting van de onzekerheid als gevolg van deze beïnvloeding te komen. In de in deze studie gepresenteerde reductiepercentages en de bijbehorende onzekerheid is dus vooralsnog geen rekening gehouden met deze beïnvloeding.

4.3 Ontbrekende of afgekeurde meetdata

4.3.1 GRIMM

In Bijlage B is de informatie met betrekking tot de kwaliteit van de metingen met de GRIMM monitoren gegeven. Daaruit blijkt dat de GRIMM op meetpunt 3 (veel) te lage concentraties meet ten opzichte van de LVS en de GRIMM op meetpunt 1. Dit leidt er regelmatig toe dat bij de uitgang van de tunnel een lagere concentratie wordt gemeten dan bij de ingang op momenten dat dit niet verklaard kan worden. Het is onduidelijk waarom de GRIMM op meetpunt 3 een veel te lage concentratie geeft. Vervuiling kan een oorzaak zijn, maar na het instellen van schoonmaakacties werden de concentraties niet hoger. Het kan niet uitgesloten worden dat de GRIMM monitor op de een of andere wijze reageert op het elektrostatisch concept. Dit is bij gebrek aan gegevens niet nader onderzocht.

Dit leidt tot de volgende conclusies:

- In principe zouden de lage waarden gemeten met de GRIMM monitor op meetpunt 3 gecorrigeerd kunnen worden. De correctie zou op basis van vergelijking met LVS metingen plaats kunnen vinden. Dit leidt echter tot grote onzekerheden. Bovendien is onbekend of de correctie afhankelijk is van het *aan* of *uit* staan van het elektrostatisch concept. Daarom is besloten om de analyse van het effect van het systeem niet te baseren op GRIMM data.
- Aangezien metingen van PM_{2.5} exclusief met GRIMM monitoren zijn uitgevoerd kan in deze studie geen uitspraak gedaan worden over de werking van het elektrostatisch concept t.a.v. PM_{2.5}.

4.3.2 TEOM

In juli 2009 zijn TEOM's geplaatst in de tunnel, omdat de vergelijking tussen de GRIMM en LVS weinig vertrouwen gaf in de meetdata. T.a.v. de TEOM's is het volgende van belang:

- Op meetpunt 1 zijn vanaf 12 juli 2009 goede TEOM data beschikbaar.
- Een van de ingezette TEOM's was van het type 1400A, de andere twee van het type 1400AB. De 1400A heeft in het begin op meetpunt 3 gestaan. Het bleek dat dit type TEOM sterk beïnvloed werd door het systeem en onrealistische (variatie in) concentraties aangaf. De TEOM op meetpunt 2 is na twee weken verplaatst naar meetpunt 3, zodat er vanaf 22 juli 2009 goede TEOM data beschikbaar zijn op meetpunten 3.
- Tijdens de proef is overwogen om de TEOM's van neutralizers te voorzien. Dit bleek echter niet haalbaar op de korte termijn.
- Voor meetpunt 2 is na enkele experimenten besloten om de beïnvloede TEOM te vervangen door een type 1400AB. Vanaf 10 september zijn de data van deze TEOM beschikbaar. Deze data zijn gebruikt voor de vergelijking tussen TEOM en LVS (zie Bijlage D).

- Tussen 4 en 10 september blijkt de TEOM op meetpunt 3 veel ruis in de metingen te hebben. Dit gedrag doet sterk denken aan het gedrag van het vervangen oudere type. Deze dagen worden in de analyse niet meegenomen. Daarna is van zulk gedrag geen sprake meer.

Informatie over de between sampler vergelijkbaarheid van de TEOM's is opgenomen in Bijlage C.

4.3.3 NO_x

De meetresultaten van de NO_x monitoren gaven geen aanleiding om metingen van de concentratie van NO_x af te keuren. In de perioden dat er goede TEOM data beschikbaar zijn, zijn de NO_x gegevens ook beschikbaar.

Informatie over de between sampler vergelijkbaarheid van de NO_x monitoren is opgenomen in Bijlage C.

5 Data-analyse methode

De data-analyse wordt uitgevoerd met behulp van de analyse van gemiddelden. Hier wordt eerst beschreven wat de analyse inhoudt en hoe statistische onzekerheden worden bepaald. Vervolgens wordt ingegaan op de verschillende analyses die uitgevoerd worden bij de schakelintervallen van 100 minuten en 24 uur. Tenslotte volgt een beschrijving van de behandeling van uitbijters in de meetdata en de analyse.

5.1 Analyse van gemiddelden

Het onderzoek moet uiteindelijk leiden tot een gemiddeld effect voor een bepaalde periode. Als methode voor de data-analyse is daarom gekozen voor de analyse van gemiddelden⁴. In de analyse van gemiddelden wordt de verhouding $\Delta PM_{10}/\Delta NO_x$ voor alle *aan* en *uit* intervallen gemiddeld. Δ staat hier voor het verschil in de concentratie tussen meetpunt 1 en 3. Als de gemiddelde verhouding bij systeem *aan* lager is dan duidt dat op een fijnstofverlagend effect van het elektrostatisch concept.

Het reductie-effect volgt uit de verhouding van de gemiddelden in *aan* en *uit* intervallen (zie ook Eq.9 in paragraaf 3.4):

$$effect = \left(1 - \frac{\text{gemiddelde} \left(\frac{\Delta PM}{\Delta NO_x} \right)_{aan}}{\text{gemiddelde} \left(\frac{\Delta PM}{\Delta NO_x} \right)_{uit}} \right) * 100\% \quad (\text{Eq.10})$$

Het effect wordt daarmee uitgedrukt als fractie van de toename van de fijnstofconcentratie in de tunnel. Deze is gelijk aan de fractie van de emissie in de tunnel. Zoals in paragraaf 3.1 al vermeld, sluit deze definitie aan bij het gebruik in modellen voor de berekening van de luchtkwaliteit.

De gemiddelde verhouding $\Delta PM_{10}/\Delta NO_x$ (voor *aan* en *uit* intervallen) wordt bepaald uit de afzonderlijke verhoudingen die binnen het 95% betrouwbaarheidsinterval rond het gemiddelde over alle verhoudingen liggen. Daarmee wordt voorkomen dat enkele extremen een onevenredig grote invloed hebben op het resultaat.

⁴ Een alternatieve methode om de metingen te analyseren gebaseerd op lineaire regressie volgens de kleinste kwadratenmethode is uitgebreid onderzocht. Deze methode geeft een goed inzicht in afwijkende patronen in de meetgegevens en kan daardoor snel problemen aan het licht brengen. Bij de kleinste kwadratenmethode wordt uitgegaan van een weging die de invloed van extreme waarnemingen vergroot. Extremen hebben op deze manier een grote invloed. Ook is het effect van het verhogen van het aantal datapunten lastig van te voren te bepalen, hetgeen een nadeel kan zijn bij het opzetten en aanpassen van de meetstrategie. Tenslotte hebben keuzes voor gewone of orthogonale regressie en het al dan niet door de oorsprong dwingen, invloed op het resultaat. Deze keuzes zijn vaak niet triviaal. In het geval van deze proef, zou in de regressie de concentratietoename van PM_{10} tegen die van NO_x uitgezet worden. De orde van grootte van beide variabelen verschilt sterk zodat orthogonale regressie niet toegepast kan worden. De gewone lineaire regressie levert significante intercepten met een orde van grootte van 100 maal de richtingscoëfficiënten die ook sterk verschillen voor een aangeschakeld en uitgeschakeld systeem. Het is daarom niet triviaal hoe het effect uit de regressiecoëfficiënten afgeleid kan worden.

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:

$$\sigma_{effect} = \sqrt{\frac{\sigma_{aan}^2}{n_{aan}} + \frac{\sigma_{uit}^2}{n_{uit}}} \left(\frac{100\%}{\text{gemiddelde} \left(\frac{\Delta PM}{\Delta NO_x} \right)_{uit}} \right) \quad (\text{Eq.11})$$

Op basis van de toevallige onzekerheid wordt getoetst of de reductie significant afwijkt van 0. Daartoe wordt de ondergrens bepaald. Dit gebeurt met een eenzijdige toets:

$$\text{ondergrens} = \text{gemiddelde} - 1.64 * \sigma \quad (\text{Eq.12})$$

Als de ondergrens groter is dan 0, is de gevonden reductie significant.

Deze statistische toets gaat uit van normale verdelingen. In meetcampagnes met een beperkt aantal datapunten zal nooit een volmaakt normale verdeling worden gevonden. Hoe meer datapunten er zijn, hoe beter de aanname getoetst kan worden. De verdelingen zoals die in deze studie gevonden worden voor de verhouding $\Delta PM_{10}/\Delta NO_x$ worden getoond en besproken in hoofdstuk 6.

Uit het effect ten opzichte van de emissie in de tunnel wordt ook het effect ten opzichte van de totale hoeveelheid fijn stof bepaald op basis van de gemiddelde verhouding achtergrond/(achtergrond+emissie in de tunnel).

De metingen in de tunnel worden slechts gedurende enkele maanden uitgevoerd. Opschaling naar een jaargemiddeld effect zou aan de orde kunnen zijn. Het is gebruikelijk bij een dergelijke opschaling rekening te houden met de invloed van parameters die sterk over het jaar variëren en een invloed hebben op de werking. De luchtvochtigheid zou zo'n parameter kunnen zijn. De invloed van de luchtvochtigheid wordt onderzocht door de data op te splitsen in klassen van luchtvochtigheid en voor deze afzonderlijke klassen de analyse uit te voeren.

5.2 Analyses in Fase 1 en 2

In Fase 1 en 2 worden verschillende analyses uitgevoerd, omdat er met verschillende schakelintervallen is gewerkt.

- Fase 1: 100 minuten

Bij de analyse van de data in de periode met een schakelinterval van 100 minuten, moeten de eerste minuten in het interval buiten beschouwing worden gelaten in verband met opstarttijd en najleffecten van het systeem. Op basis van onderzoek tijdens een nachtelijke afsluiting door BAM is gekozen voor de eerste 15 minuten. Het effect van het uitsluiten van een groter aantal minuten wordt besproken in Bijlage E.

Het interval wordt geïdentificeerd door verandering van het gelogde *aan/uit* signaal, aangezien de intervallengte niet constant is.

- Fase 2: 24 uur

Bij de analyse van de data in de periode met een schakelinterval van 24 uur, worden de dagen opgedeeld in intervallen van een uur. Het eerste uur wordt buiten de analyse gelaten, i.v.m. opstart/naijleffecten van het systeem.

Naast de analyse op basis van alle *aan* en *uit* intervallen wordt de analyse ook uitgevoerd voor elk uur op de dag, gemiddeld over de dagen. Op die manier kan de variatie van het effect over de dag bepaald worden. Dat is belangrijk aangezien de grootste fijnstofemissies in de tunnel overdag plaatsvinden. Het is de verwachting dat het relatieve effect in de uren overdag lager kan zijn omdat het dan minder vochtig is. Op basis van de gevonden variatie kan een betere schatting van het effect gegeven worden.

5.3 Behandeling van uitbijters

Sommige meetresultaten wijken zodanig af van het normale patroon dat zij een onevenredig grote invloed zouden hebben op de resultaten. Deze kunnen dan als uitbijters verwijderd worden.

- Aan/uit signaal

Het aan/uit signaal dat door M+P gelogd wordt, wordt visueel gecontroleerd op uitbijters (d.m.v. een grafiek van het verloop van het signaal in de tijd op minuutbasis). Het komt namelijk incidenteel voor dat het signaal tijdens een *aan* periode enkele minuten op 0 staat. Het is aannemelijk dat dit duidt op een foutieve logging en niet op het kortstondig uitgaan van het systeem. De signaalwaarde wordt voor de betreffende minuten handmatig op *aan* gezet in de invoerfile.

Op 17 en 18 augustus is het aan/uit signaal wegens storing niet gelogd door M+P. Op die dagen zijn de gegevens van BAM gebruikt.

Op 25 augustus wordt de uren tussen 18 en 20 uur GMT buiten beschouwing gelaten, omdat het systeem toen 26 minuten achter elkaar *aan* heeft gestaan, terwijl dit een *uit* dag was.

- Concentratiemetingen

Negatieve minuutgemiddelde concentratiemetingen worden niet meegenomen in de bepaling van de gemiddelde concentratie in de intervallen. Negatieve concentraties zouden voor kunnen voorkomen wanneer een meetsysteem werkzaam is dicht bij zijn detectiegrens. De gemiddelde concentratie is dan gelijk aan nul en de meetwaarden fluctueren boven en onder de nul. Er wordt vanuit gegaan dat de concentratie nooit in de buurt van de detectiegrens van de apparatuur komt en dat negatieve concentraties dus artefacten zijn.

- Analyse van gemiddelden

Om uitbijters die op het gemiddelde een onevenredig grote invloed hebben te identificeren, worden 95-percentielen bepaald rondom de gemiddelde verhouding $\Delta PM_{10}/\Delta NO_x$. Over de verhoudingen die binnen het 95% betrouwbaarheidsinterval liggen wordt het gemiddelde opnieuw bepaald.

6 Resultaten

Dit hoofdstuk begint met een overzicht van de geselecteerde meetdagen en -intervallen voor de analyse. Vervolgens wordt een situatieschets van de omstandigheden in de buitenlucht (meteorologie en fijnstofconcentratie) tijdens de meetperiode gegeven.

De paragrafen erna richten zich op het effect van het elektrostatisch concept, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen Fase 1 en Fase 2 van de meetcampagne.

6.1 Geselecteerde meetdagen en -intervallen

6.1.1 Fase 1

Gedurende Fase 1 zijn TEOM's bijgeplaatst. Vanaf 22 juli 2009 zijn er op meetpunt 1 en 3 goede TEOM meetdata beschikbaar.

In de analyse van Fase 1 zijn intervallen meegenomen op de volgende dagen:

- 22 juli t/m 31 juli 2009
- 9 augustus t/m 17 augustus 2009

Van 1 t/m 6 augustus heeft de TEOM op meetpunt 3 in storing gestaan en zijn geen data beschikbaar. 7 en 8 augustus zijn buiten de analyse gelaten omdat het systeem op deze dagen uit heeft gestaan. Het grootste deel van 17 en 18 augustus heeft de TEOM op meetpunt 3 opnieuw geen data geleverd.

Na het verwijderen van uitbijters in de meetdata (zie paragraaf 5.3) levert dit het volgende aantal intervallen op:

- Aan: 122 intervallen
- Uit: 124 intervallen

6.1.2 Fase 2

In de analyse van Fase 2 zijn intervallen meegenomen op de volgende dagen:

- 20 augustus t/m 3 september 2009
- 10 september t/m 21 september 2009

Van 4 t/m 9 september liet de TEOM op meetpunt 3 een veel grotere ruis-sigitaal verhouding zien dan in de perioden ervoor en erna. Deze dagen zijn in de analyse niet meegenomen. Op 21 september heeft het systeem, voordat de meetopstellingen ontmanteld werden, tot aan 18:00 GMT aangestaan. De uren erna zijn niet meegenomen.

Na het verwijderen van uitbijters in de meetdata (zie paragraaf 5.3) levert dit het volgende aantal intervallen op:

- Aan: 306 intervallen
- Uit: 292 intervallen

6.2 Omstandigheden

6.2.1 Fase 1

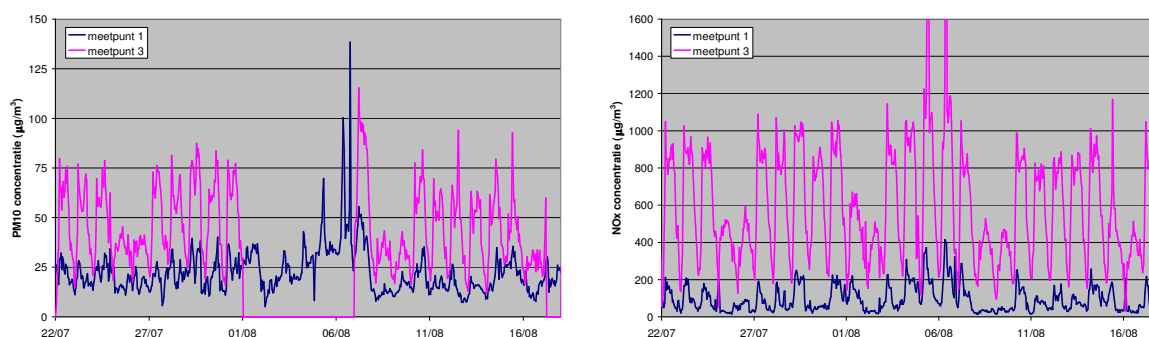
Tijdsreeksen van de fijnstofconcentraties (PM_{10} en $PM_{2.5}$), neerslag, luchtvochtigheid, temperatuur, windrichting en windsnelheid in de buitenlucht zijn opgenomen in Bijlage F. Daaruit blijkt het volgende:

- De fijnstofconcentratie was variabel. Op 5, 6 en 7 augustus was de concentratie het hoogst: enkele uurgemiddelde PM_{10} -concentraties kwamen boven de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ uit. Gemiddeld gezien bestaat een groot deel (72%) van de concentratie van PM_{10} uit $PM_{2.5}$.
- De temperatuur lag rond de 20°C , waarbij de maximum temperatuur op 1, 4, 5 en 6 augustus boven de 25°C uitkwam.
- Tijdens de meetperiode in Fase 1 is weinig neerslag gevallen.
- De maximale luchtvochtigheid overdag schommelde tussen 50 en 90%.
- Er was een sterke dagelijkse gang in zowel temperatuur als vochtigheid waarbij de relatieve vochtigheid 's nachts doorgaans hoger was dan overdag.
- De droogste dagen komen overeen met de warmste dagen en vallen ook samen met de dagen met de hoogste concentratie van fijn stof.
- De wind heeft het grootste deel van de meetperiode uit het zuiden tot zuidwesten gewaaid. Tijdens de dagen met de hoogste fijnstofconcentraties was de wind noordelijk. De windsnelheid varieerde tussen 0 en 5 m/s. De wind kwam niet boven kracht 3 op de schaal van Beaufort uit.

Figuur 5 illustreert de fluctuaties in de uurgemiddelde concentraties van PM_{10} (TEOM) en NO_x aan de ingang en de uitgang van de tunnel. De concentratie van PM_{10} neemt op werkdagen gemiddeld met ongeveer $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ toe tussen de in- en uitgang van de tunnel. Aan het eind van de tunnel bestaat de concentratie van PM_{10} dan voor ongeveer 33% uit aerosolen die afkomstig zijn uit de buitenlucht en voor 67% uit aerosolen die in de tunnel ontstaan zijn. Voor NO_x is de gemiddelde toename op werkdagen 700 à $800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en bestaat de concentratie aan het eind van de tunnel voor ongeveer 80% uit in de tunnel gevormde NO_x .

De dagelijkse en week/weekend patronen zijn in zowel de PM_{10} als NO_x concentraties aan de uitgang van de tunnel (meetpunt 3) duidelijk te zien. Deze patronen zijn in mindere mate ook aan de ingang van de tunnel (meetpunt 1) zichtbaar, maar de fluctuaties in de achtergrondconcentratie komt hierin duidelijker naar voren (vergelijk met Figuur 23 in Bijlage F).

De fluctuaties in de concentraties op de tijdschaal van uren is zoals verwacht groot. Het is dus nodig hiermee in de meetstrategie en data analyse rekening te houden.



Figuur 5: Uurgemiddelde concentratie van PM_{10} , gemeten met TEOM (links) en NO_x (rechts)⁵, op de meetpunten 1 en 3 in de tunnel tijdens Fase 1. De tijdreeks begint op woensdag 22 juli.

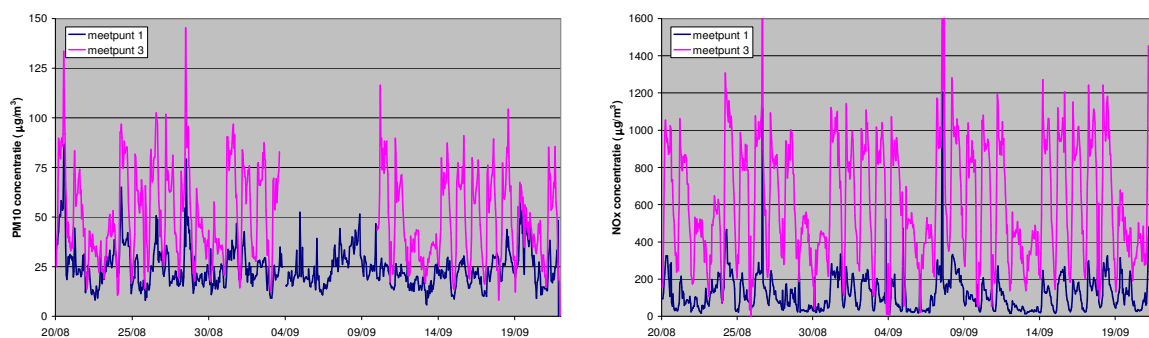
⁵ De NO_x pieken bij meetpunt 3 op 5 en 6 augustus lopen door tot ruim $3000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Deze hoge waarden zijn niet als uitbijters weggelaten omdat ze gedurende langere tijd (ongeveer 2 uur) voorkwamen. 5 en 6 augustus worden overigens in de data analyse niet meegenomen vanwege een storing in de Teom op meetpunt 3.

6.2.2 Fase 2

Tijdseries van de fijnstofconcentraties (PM₁₀ en PM_{2.5}, tot 4 september 2009 beschikbaar), neerslag, luchtvochtigheid, temperatuur, windrichting en windsnelheid in de buitenlucht zijn opgenomen in Bijlage F. Daaruit blijkt het volgende:

- De fijnstofconcentratie was variabel. Aangezien de GRIMM op meetpunt 4 lagere concentraties aangaf tijdens de onderlinge vergelijking van de GRIMM monitoren na 4 september 2009, kan de juistheid van het absolute niveau van de concentraties niet beoordeeld worden.
- De temperatuur lag rond de 20°C, waarbij de maximum temperatuur op 20, 23, 24 en 31 augustus en 8 september boven de 25 °C uitkwam.
- Tijdens de meetperiode in Fase 2 is weinig neerslag gevallen. In de nacht van 29 op 30 augustus is er kortdurend veel neerslag gevallen. Tussen 2 en 5 september heeft het langduriger geregend, maar waren de hoeveelheden niet groot.
- De maximale luchtvochtigheid overdag schommelde tussen 55 en 90%. Gemiddeld gezien was de luchtvochtigheid iets lager dan tijdens Fase 1.
- Er was een sterke dagelijkse gang in zowel temperatuur als vochtigheid waarbij de relatieve vochtigheid 's nachts doorgaans hoger was dan overdag.
- De droogste dagen komen overeen met de warmste dagen.
- De wind heeft tussen 20 augustus en 9 september uit het westen tot zuidoosten gewaaid. Van 9 september tot en met 21 september was de wind noordelijk. De windsnelheid varieerde tussen 0 en 8 m/s. De wind kwam niet boven kracht 4 op de schaal van Beaufort uit.

Figuur 6 illustreert de fluctuaties in de uurgemiddelde concentraties van PM₁₀ (TEOM) en NO_x aan de ingang en de uitgang van de tunnel. De concentratieverschillen tussen in- en uitgang en de patronen in de tijd komen sterk overeen met die in Fase 1 (zie Figuur 5). De grote fluctuatie in de concentraties op de tijdschaal van uren rechtvaardigt de gekozen meetstrategie en methode van data analyse.

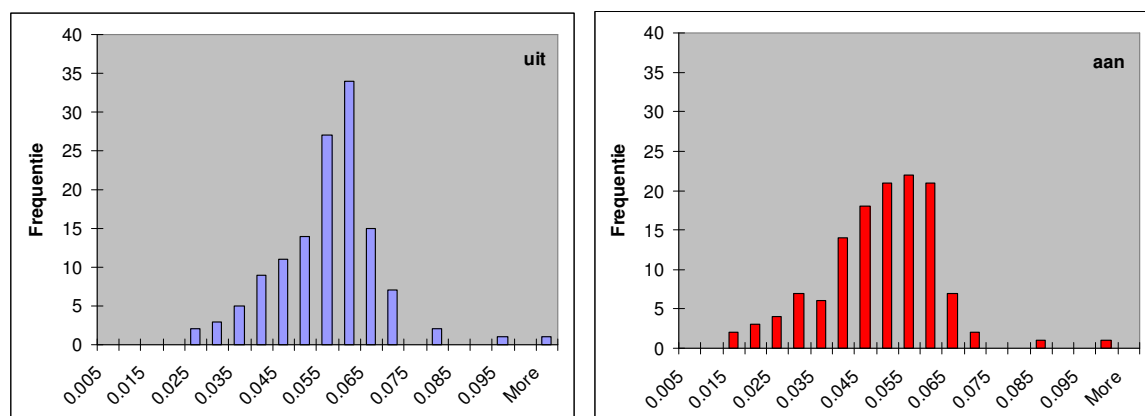


Figuur 6: Uurgemiddelde concentratie van PM₁₀, gemeten met TEOM (links) en NO_x (rechts), op de meetpunten 1 en 3 in de tunnel tijdens Fase 2. De tijdreeks begint op donderdag 20 augustus.

6.3 Effectiviteit in Fase 1 bij een schakelinterval van 100 minuten

6.3.1 Gemiddelde effectiviteit

De effectiviteit van het elektrostatisch concept wordt onderzocht door de gemiddelde verhouding $\Delta PM_{10}/\Delta NO_x$ tijdens *aan* en *uit* intervallen met elkaar te vergelijken. De verhouding wordt voor alle intervallen afzonderlijk bepaald en vervolgens gemiddeld. Om een beeld te krijgen van de verdeling van de individuele verhoudingen rondom het gemiddelde, worden de verhoudingen in de afzonderlijke *aan* en *uit* intervallen in klassen ingedeeld en in een frequentieverdeling (histogram) getoond.



Figuur 7: Verdeling van de verhouding $\Delta PM_{10}/\Delta NO_x$ over de intervallen bij een schakelinterval van 100 minuten. Links: *uit* intervallen, rechts: *aan* intervallen.

In Figuur 7 is de frequentieverdeling van deze verhoudingen voor de *uit* en *aan* intervallen in Fase 1 gegeven. Het volgende valt op:

- De verhoudingen van de *uit* intervallen zijn normaal verdeeld. De spreiding heeft waarschijnlijk te maken met variatie over de dag. De lagere waarden voor de verhoudingen komen vooral in de nachtelijke uren voor. Dit kan te maken hebben met het grotere aandeel vrachtverkeer (waarvoor de emissieverhouding PM_{10}/NO_x lager is dan voor personenvoertuigen) of met de lagere verkeersintensiteit zodat het aandeel van resuspensie in PM_{10} lager is.
- Bij de *aan* intervallen bestaat de verdeling uit een normaal deel aan de kant van de lage waarden en een een abrupte daling van het aantal intervallen met hogere waarden.

Het feit dat de verdeling voor de *aan* intervallen niet perfect normaal is, beperkt de mogelijkheden om de statistische onzekerheid te bepalen. De in paragraaf 5.1 gepresenteerde methode wordt voorsnog wel toegepast⁶.

De verhoudingen die buiten het 95% betrouwbaarheidsinterval rondom het gemiddelde over alle intervallen lagen zijn als uitbuiters aangemerkt. De gemiddelde verhouding en het daaruit afgeleide reductiepercentage op basis van de intervallen exclusief deze uitbijters is gegeven in Tabel 3.

⁶ Bij de resultaten van Fase 2 wordt de niet normale verdeling verder onderzocht en de implicaties voor de statistische analyse besproken.

Tabel 3: Reductie bepaald bij een schakelinterval van 100 minuten.

Aantal <i>uit</i> intervallen	124
Aantal <i>aan</i> intervallen	122
Gemiddelde verhouding $\Delta PM_{10}/\Delta NO_x$ <i>uit</i>	0.0526
Gemiddelde verhouding $\Delta PM_{10}/\Delta NO_x$ <i>aan</i>	0.0467
Gemiddelde reductie (%)	11.3
2 σ onzekerheid	4.7
Ondergrens (95% betrouwbaarheid, eenzijdig getoetst)	7.4
Significant (als ondergrens>0)	ja

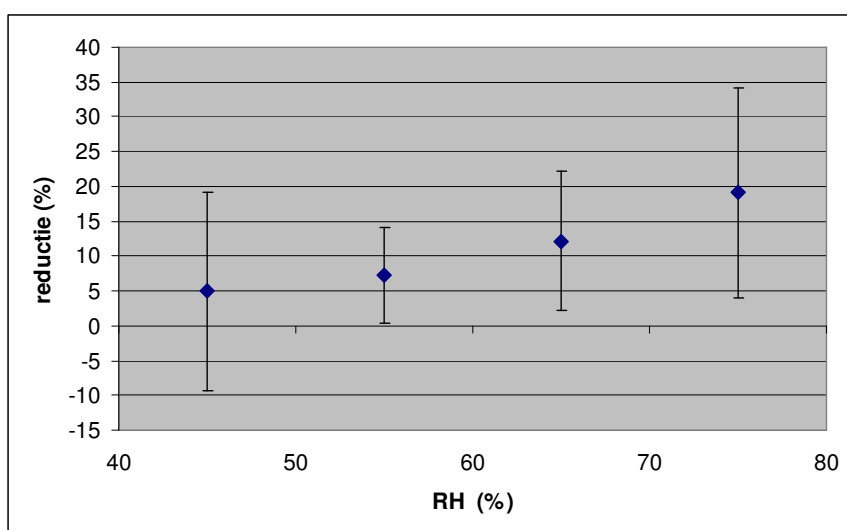
Tabel 3 laat het volgende zien:

- Het reductiepercentage is 11 +/- 5% (2 σ onzekerheid).
- De gevonden reductie wijkt significant af van nul.

Het bovenstaande reductiepercentage is bepaald ten opzichte van de in de tunnel geëmitteerde hoeveelheid fijn stof. Wanneer de reductie wordt uitgedrukt ten opzichte van de totale concentratie aan het eind van de tunnel (achtergrond+ het in de tunnel geëmitteerde PM10) zou deze 7 +/- 3% bedragen.

6.3.2 Afhankelijkheid van de luchtvochtigheid

Om de invloed van luchtvochtigheid op het reductie-effect te onderzoeken, zijn de intervallen op basis van de metingen van de relatieve luchtvochtigheid (gemiddeld over meetpunten 1 en 3 in de tunnel) in klassen van 10% ingedeeld. De analyse is voor deze klassen apart uitgevoerd (zie Figuur 8).



Figuur 8: Het gemiddelde reductie-effect (en 2 σ onzekerheid) als functie van de relatieve luchtvochtigheid (gemiddeld over meetpunten 1 en 3) voor de vochtclassen 40-50%, 50-60%, 60-70% en 70-80%. In de vochtclassen <40% en >80% lagen te weinig meetwaarden.

Uit Figuur 8 wordt geconcludeerd dat:

- het gemiddelde effect toeneemt met de luchtvochtigheid⁷. De toename is aanzienlijk (van 5 naar bijna 20% bij een toename in de luchtvochtigheid van 45 naar 75%).

6.3.3 Conclusies voor Fase 1

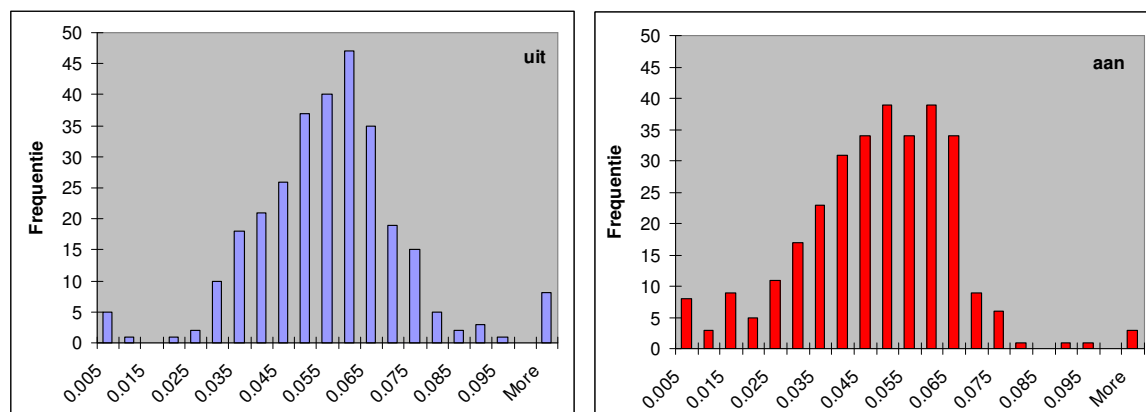
- Het reductie-effect van het elektrostatisch concept op PM_{10} is 11 +/- 5% ten opzichte van de in de tunnel geëmitteerde hoeveelheid fijn stof.
- Ten opzichte van de totale hoeveelheid fijn stof is het effect 7 +/- 3%.
- Het effect neemt toe met de relatieve luchtvochtigheid in de tunnel.

6.4 Effectiviteit in Fase 2 bij een schakelinterval van 24 uur

6.4.1 Gemiddelde effectiviteit

De verdelingen van de verhouding $\Delta PM_{10}/\Delta NO_x$ van de aan en uit intervallen zijn gegeven in Figuur 9 (voor meer detail wordt verwezen naar paragraaf 6.3). Het volgende valt op:

- Zowel bij de *uit* als de *aan* intervallen liggen er een aantal intervallen aan de buitenkant van de verdeling. Deze vallen buiten het 95%-betrouwbaarheidsinterval, zodat ze in de analyse niet meegenomen worden.
- Net als in Fase 1 zijn de verhoudingen van de *uit* intervallen normaal verdeeld.
- Net als in Fase 1 bestaat de verdeling bij de *aan* intervallen uit een normaal deel aan de kant van de lage waarden en een abrupte daling van het aantal intervallen met hogere waarden.



Figuur 9: Verdeling van de verhouding $\Delta PM_{10}/\Delta NO_x$ over de intervallen bij een schakelinterval van 24 uur. Links: *uit* intervallen, rechts: *aan* intervallen.

Blijkbaar beïnvloedt het elektrostatisch concept de verdeling van de verhouding $\Delta PM_{10}/\Delta NO_x$. Bij de lage waarden (aan de linkerkant van de verdeling) schuift de verdeling met een aangeschakeld systeem naar nog lagere waarden op. Hoe meer de verhouding naar 0 gaat, hoe meer ruis er in de

⁷ De relatieve luchtvochtigheid fluctueert samen met een aantal andere belangrijke parameters zoals de verkeersintensiteit en daarmee de concentratietoename in de tunnel. Het is daarom niet zeker dat het gevonden verband met de luchtvochtigheid ook daadwerkelijk een gevolg is van de luchtvochtigheid. Onderzoek daarnaar is een belangrijke aanbeveling voor verder onderzoek.

metingen komt. Dit is te verklaren door het wegvangen van fijn stof, waardoor het concentratieverschil tussen de ingang en uitgang van de tunnel klein wordt (vooral in de nachtelijke uren). Aan de rechterkant van de verdeling komen bij een aangeschakeld systeem minder hoge waarden voor. De hogere verhoudingen komen vooral overdag voor. Dit kan er op duiden dat het wegvangen van fijn stof overdag effectief gebeurt. Maar waarom de verdeling daar niet normaal blijft, is onduidelijk.

Om dit verder te onderzoeken zijn de intervallen verdeeld in dag/nacht en luchtvochtigheid <60% en >60%. De resulterende verdelingen zijn gegeven in Bijlage G, maar leveren geen nieuwe inzichten op.

In de bepaling van de statistische onzekerheid wordt uitgegaan van een normale verdeling. Het is duidelijk dat deze aanname voor de *aan* intervallen niet helemaal opgaat. Echter, gezien de vorm van de verdeling is het aannemelijk dat de standaarddeviatie niet sterk verandert. Daarom wordt het zinvol geacht om de statistische analyse die in paragraaf 5.1 gepresenteerd is wel toe te passen.

De verhoudingen die buiten het 95% betrouwbaarheidsinterval rondom het gemiddelde over alle intervallen lagen zijn als uitbuiters aangemerkt. Het reductiepercentage op basis van de intervallen exclusief deze uitbijters is gegeven in Tabel 4.

Tabel 4: Reductie bepaald bij een schakelinterval van 24 uur. De dagen zijn verdeeld in intervallen van een uur. Het eerste uur van de dag is buiten beschouwing gelaten.

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
Gemiddelde reductie (%)	14.7
2 σ onzekerheid	6.0
Ondergrens (95% betrouwbaarheid, eenzijdig getoetst)	10.0
Significant (als ondergrens>0)	Ja

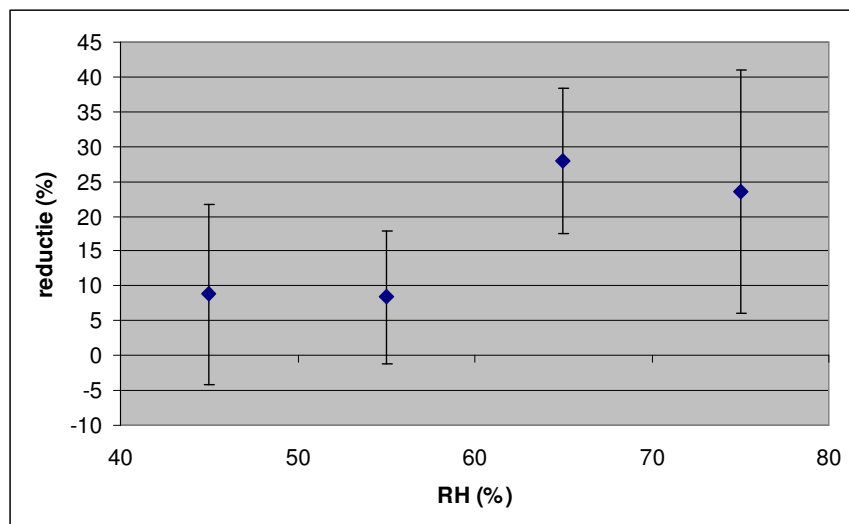
Tabel 4 laat het volgende zien:

- Het reductiepercentage is 15 +/- 6% (2 σ onzekerheid).
- De gevonden reductie is significant. De ondergrens wijkt overtuigend af van nul. Het feit dat de statistische toets toegepast is terwijl de verdeling van de *aan* intervallen niet normaal is, leidt daarom niet tot twijfel over de significantie.

Het bovenstaande reductiepercentage is bepaald ten opzichte van de in de tunnel geëmitteerde hoeveelheid fijn stof. Wanneer de reductie wordt uitgedrukt ten opzicht van de totale concentratie aan het eind van de tunnel (achtergrond+ het in de tunnel geëmitteerde PM10) zou deze 9 +/- 4% bedragen.

6.4.2 Afhankelijkheid van de luchtvochtigheid

Figuur 10 toont de afhankelijkheid van het effect van de luchtvochtigheid in Fase 2.



Figuur 10: Het gemiddelde reductie-effect (en 2σ onzekerheid) als functie van de relatieve luchtvochtigheid (gemiddeld over meetpunten 1 en 3) voor de vochtklassen <40%, 40-50%, 50-60%, 60-70%, 70-80% en >80%. In de vochtklassen <40% en >80% lagen weinig datapunten (15 en 6 respectievelijk).

Uit Figuur 10 wordt het volgende geconcludeerd:

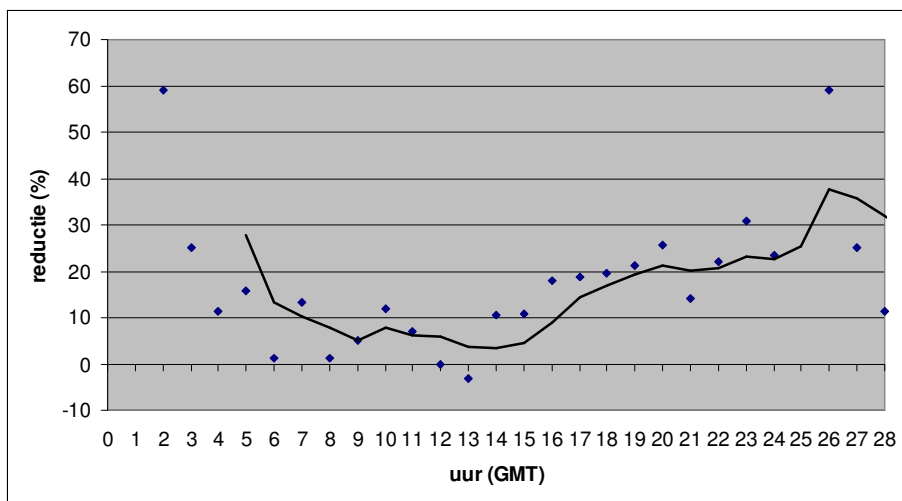
- Het gemiddelde effect is gevoelig voor de luchtvochtigheid⁸.
- Het effect is in droge lucht (RH<60%) lager dan in vochtigere (RH>60%).

6.4.3 Verloop van het effect over de dag

Uit het voorgaande blijkt dat het relatieve effect gevoelig is voor de luchtvochtigheid. De luchtvochtigheid heeft een sterke dagelijkse gang, met de hoogste waarden tijdens de nacht en de laagste waarden overdag. Op basis daarvan is het de verwachting dat het reductiepercentage in de nachtelijke uren hoger is dan overdag.

Het gemiddeld verloop van het reductiepercentage over de dag in Fase 2 is weergegeven in Figuur 11. De spreiding in de percentages is groot omdat er gemiddeld slechts 13 *uit* en *aan* intervallen zijn per uur. Daarom is ook het lopend gemiddelde over een periode van 4 uur in de grafiek geplott. Daaruit blijkt dat er inderdaad een verloop van het relatieve effect over de dag is met in de avond en nacht de hoogste reductiepercentages.

⁸ De relatieve luchtvochtigheid fluctueert samen met een aantal andere belangrijke parameters zoals de verkeersintensiteit en daarmee de concentratietoename in de tunnel. Het is daarom niet zeker dat het gevonden verband met de luchtvochtigheid ook daadwerkelijk een gevolg is van de luchtvochtigheid. Onderzoek daarnaar is een belangrijke aanbeveling voor verder onderzoek.



Figuur 11: Gemiddeld verloop van het reductiepercentage over de dag tijdens Fase 2. De zwarte lijn is het lopend gemiddelde over de afgelopen 4 uur. 25, 26, 27 en 28 uur corresponderen met respectievelijk 1, 2, 3 en 4 uur. Voor 1 GMT is geen waarde geplot, omdat het uur van 0 tot 1 GMT wegens opstart/naijleffecten buiten beschouwing is gelaten.

's Nachts is de concentratie van fijn stof in de tunnel lager dan overdag als gevolg van lagere emissies door wegverkeer. Het valt te verwachten dat de reductie in absolute zin in de nachtelijke uren daardoor *niet* het hoogst zal zijn.

Ter indicatie is uit het gemiddelde verloop van de PM_{10} bijdrage in de tunnel (ΔPM_{10}) met behulp van het gemiddeld verloop van de reductiepercentages, het gemiddeld verloop van de absolute reductie over de dag berekend:

$$reductie_{absoluut} = reductie_{relatief} * \Delta PM_{10} \quad (\text{Eq.13})$$

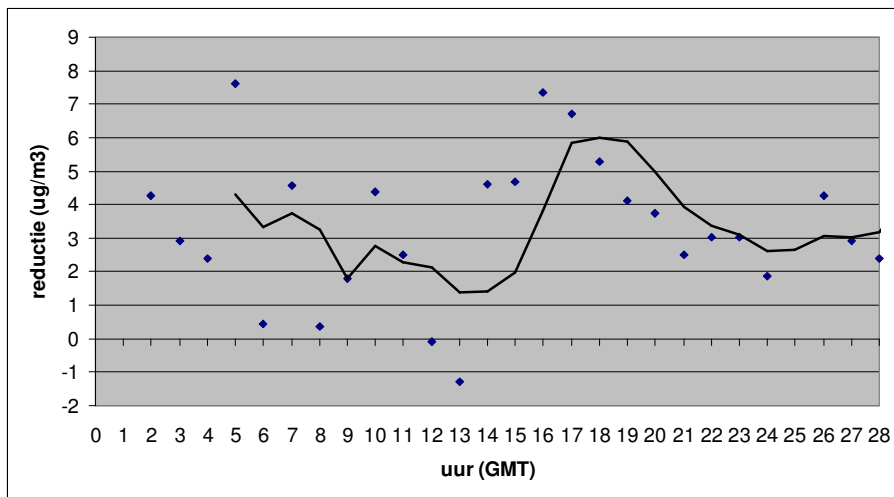
Het resultaat staat in Figuur 12. Daaruit volgt dat de piek in de absolute reductie eerder op de dag plaatsvindt dan de piek in de relatieve reductie.

Door de absolute reductie per uur te sommeren over de (gemiddelde) dag en dat te delen door de totale PM_{10} bijdrage over de (gemiddelde) dag kan alsnog een gewogen daggemiddelde reductie worden afgeleid:

$$reductie(\%) = \frac{\sum_{01-00GMT} reductie_{absoluut}}{\sum_{01-00GMT} \Delta PM_{10}} \quad (\text{Eq.14})$$

Het op deze manier geschatte reductiepercentage is 12%⁹. Dat is iets lager dan het eerder gevonden gemiddelde reductiepercentage van 15%, maar gezien de onzekerheden lijken de verschillen niet significant.

⁹ De bepaling van de onzekerheid hierin is niet triviaal. De onzekerheid wordt geschat op 4-6%.



Figuur 12: Gemiddeld verloop van de absolute reductie ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) over de dag tijdens Fase 2. De zwarte lijn is het lopend gemiddelde over de afgelopen 4 uur. 25, 26, 27 en 28 uur corresponderen met respectievelijk 1, 2, 3 en 4 uur. Voor 1 GMT is geen waarde geplott, omdat het uur van 0 tot 1 GMT wegens opstart/naijleffecten buiten beschouwing is gelaten.

6.4.4 Conclusies voor Fase 2

- Het reductie-effect van het elektrostatisch effect op PM_{10} is $15 \pm 6\%$ ten opzichte van de in de tunnel geëmitteerde hoeveelheid fijn stof.
- Ten opzichte van de totale hoeveelheid fijn stof is het effect $9 \pm 4\%$.
- Het effect is gevoelig voor de relatieve luchtvochtigheid in de tunnel, waarbij hogere luchtvochtigheden ($\text{RH} > 60\%$) overeenkomen met een hoger reductiepercentage.
- De hoogste reductiepercentages komen 's nachts voor, terwijl de PM_{10} bijdrage door het verkeer dan juist laag is. De reductie in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ piekt als gevolg daarvan overdag. Het (met de absolute reductie) gewogen gemiddelde reductiepercentage ligt met 12% in dezelfde orde van grootte als het niet gewogen percentage (15%).

7 Optimalisatie

De in de Thomassentunnel geplaatste configuratie van het elektrostatisch concept is ontworpen op basis van theoretische en praktische overwegingen. Deze zijn mede gebaseerd op eerder uitgevoerde experimenten in een proeftunnel. De dimensies van deze tunnel verschillen echter aanzienlijk van die van de Thomassentunnel. Ook veel andere parameters zoals turbulentie-intensiteit, windsnelheid enzovoort zullen in de Thomassentunnel anders zijn dan in de proeftunnel. Bij de opzet en implementatie van het systeem in de Thomassentunnel is uiteraard getracht om tot een optimaal werkend systeem te komen. Daarbij konden niet alle kanten van de opschaling naar de Thomassentunnel exact worden voorspeld.

Uit door BAM/TUD uitgevoerd onderzoek in de tunnel zijn nu al enkele aspecten naar voren gekomen die aanleiding zijn te veronderstellen dat verdere verbetering mogelijk is. Op de mogelijkheden voor verdere optimalisatie wordt ingegaan in een het door BAM/TUD opgesteld document. Dit rapport is opgenomen in Bijlage H.

Volgens dit document zouden enkele belangrijke verbeteringen kunnen zijn:

- het vergroten van het aantal actieve rekken;
- het aanpassen van hun ontwerp;
- het optimaliseren van de positie van zowel de actieve als passieve rekken.

Een aangepaste configuratie zou, volgens dit rapport, kunnen leiden tot een aanzienlijke verbetering van de werking van het systeem. Voor een betrouwbare schatting van effectiviteit van het systeem onder optimale condities is kwantitatieve kennis van de processen die een rol spelen bij de werking van het systeem nodig. Het is op dit moment niet zonder meer duidelijk hoe belangrijk de verschillende processen (zoals turbulentie, elektrische mobiliteit, enz.) zijn. Het is daarom op dit moment moeilijk vast te stellen welke effectiviteit kan worden bereikt bij een optimale configuratie en onder optimale condities.

8 Toepasbaarheid

Het reductiepercentage dat in deze studie is bepaald is geldig voor de linkertunnelbuis van de Thomassentunnel in de zomer van 2009. Dit is echter niet zonder meer representatief voor het jaargemiddelde. Daarnaast geven de in de Thomassentunnel uitgevoerde metingen geen inzicht in de werking van het systeem in andere tunnels. Er is mogelijk invloed van parameters zoals de verkeersintensiteit en samenstelling of de tunnelconfiguratie op het reductiepercentage. Bij generalisatie van de resultaten zou met deze aspecten rekening dienen te worden gehouden.

Naast deze vraagstukken over representativiteit speelt ook de vraag naar de werkelijke betekenis van de reductie. De reductiepercentages zoals beschreven in deze studie geven een indicatie van de efficiëntie waarmee fijn stof kan worden afgevangen in een tunnel. In het kader van de Regeling Beoordeling Luchtkwaliteit krijgt deze reductie pas betekenis als het doorvertaald wordt in de afname van de concentratie van fijn stof bij tunnelmonden.

In bijlage L is een rapport van TNO opgenomen waarin de invloed van het afvangen van fijn stof op de concentratie van PM_{10} bij tunnelmonden wordt gepresenteerd. Er zijn berekeningen uitgevoerd van de jaargemiddelde concentratie in 2008. Uit de jaargemiddelde concentratie is het aantal overschrijdingsdagen in 2008 afgeleid. De berekeningen zijn uitgevoerd conform de Regeling Beoordeling Luchtkwaliteit (versie oktober 2009).

Naast de Thomassentunnel zijn drie andere tunnels met een hogere verkeersintensiteit (de Beneluxtunnel, de Coentunnel en de Schipholtunnel) doorgerekend. Op deze manier is bepaald hoe gevoelig de afname van het aantal overschrijdingsdagen is voor de gekozen tunnel.

Ook is bepaald hoe gevoelig de afname van het aantal overschrijdingsdagen is voor het optredende reductie-effect. Ter indicatie zijn daarom berekeningen uitgevoerd bij verschillende reductiepercentages:

- 10 en 20% als orde van grootte van het percentage dat in deze studie is bepaald;
- de voornamelijk fictieve percentages van 40 en 60% om de invloed van (verregeande) optimalisatie te illustreren.

Deze berekeningen laten zien dat de inzet van het elektrostatisch concept in de Thomassentunnel (met een jaargemiddelde effectiviteit van 10 tot 20 %) zou leiden tot een verlaging van het aantal overschrijdingsdagen met 1-2 dagen in 2008. Bij reductiepercentages van 40 en 60% neemt dit toe tot 4-6 dagen. Bij tunnels met een hogere verkeersintensiteit en achtergrondconcentratie (Beneluxtunnel, Coentunnel en Schipholtunnel) is de verlaging bij 10% reductie gemiddeld 4 dagen en bij 20% 7-11 dagen. Dit zou bij 40% oplopen tot 15-22 dagen en bij 60% tot 22-32 dagen.

De berekeningen geven een indicatie bij verschillende reductiepercentages voor de jaargemiddelde situatie in 2008. Variaties in meteorologische omstandigheden en achtergrondconcentraties tussen jaren maakt dat het aantal overschrijdingsdagen per jaar (bij gelijkblijvende andere omstandigheden) kan verschillen.

9 Conclusies en Aanbevelingen

Het praktijkonderzoek naar de werkzaamheid van het elektrostatisch concept bij de configuratie die in de Thomassentunnel in de zomer van 2009 is geïnstalleerd leidt tot de volgende conclusies:

Fasering

- Op basis van onderzoek van BAM naar de snelheid waarmee het systeem in de tunnel reageert op het aan- en uitschakelen, is in Fase 1 gekozen voor een schakelinterval van 100 minuten.
- In Fase 2 is gewerkt met een schakelinterval van 24 uur. Op die manier kon het effect van het systeem ook bij langdurigere toepassing onderzocht worden.

Kwaliteit van de metingen

- De NO_x metingen zijn gebruikt om te corrigeren voor fluctuaties in omstandigheden anders dan het aan- en uitschakelen van het systeem (de doorstroomsnelheid van lucht door de tunnel en de emissie van het verkeer in de tunnelbuis). Uit de metingen blijkt dat er geen significant verschil is in de toename van de NO_x concentratie in de tunnel tijdens perioden met een aangeschakeld systeem en perioden met een uitgeschakeld systeem. NO_x is dus een voor het elektrostatisch concept ongevoelige component en dus als referentiestof bruikbaar. Dit ondersteunt de gekozen aanpak.
- De kwaliteit van de metingen met de GRIMM fijnstofmonitoren is via onderlinge vergelijkingen van de monitoren en vergelijkingen van de concentratie van PM₁₀ met LVS metingen onderzocht. De kwaliteit bleek onvoldoende om de analyse op de GRIMM data te baseren. Het niet goed functioneren van de GRIMM monitoren kan een gevolg zijn van beïnvloeding door het elektrostatisch concept (geladen deeltjes) of er kunnen andere artefacten een rol spelen.
- De kwaliteit van de PM₁₀ metingen met de TEOM monitoren, die halverwege de praktijkproef zijn geïnstalleerd, is op basis van vergelijkingen met LVS metingen onderzocht (zie verder onder Onzekerheid).

Onzekerheid

- Gezien de meetstrategie (waarbij het elektrostatisch concept afwisselend heeft aan- en uitgestaan) spelen onzekerheden als between sampler onzekerheid en systematische fouten in de meetapparatuur in deze studie geen rol. Er wordt immers afwisselend bij een werkend en niet werkend systeem met dezelfde monitoren gemeten.
- Systematische beïnvloeding van de metingen door het elektrostatisch concept zou ten onrechte worden geïnterpreteerd als een effect (of juist een negatief effect afhankelijk van de richting van de beïnvloeding). Het is daarom van het grootste belang om dit aspect goed in kaart te brengen. Geconcludeerd wordt:
 - De vergelijking tussen de TEOM en LVS geeft een indicatie dat de metingen met de TEOM beïnvloed kunnen zijn door het elektrostatisch concept. Het kan daarbij gaan om beïnvloeding ter grootte van enkele procentpunten.
 - Door het beperkte aantal metingen en de kwaliteit daarvan kan deze indicatie (hypothese) bevestigd noch verworpen worden.
 - Het is op basis van de huidige meetdata niet mogelijk om tot een correctie dan wel betrouwbare schatting van de onzekerheid als gevolg van deze beïnvloeding te komen. In de in deze studie gepresenteerde reductiepercentages en de bijbehorende onzekerheid is dus vooralsnog geen rekening gehouden met deze beïnvloeding.
 - Nader onderzoek is nodig om het effect van eventuele beïnvloeding in kaart te brengen.
- Als gevolg van bovenstaande is in de onzekerheidsanalyse alleen rekening gehouden met de willekeurige fouten (ruis) in de gemeten waarden.

Werking van het elektrostatisch concept tijdens de praktijkproef

- Tijdens Fase 1 van de praktijkproef (met een schakelinterval van 100 minuten) is het gemeten reductie-effect van het elektrostatisch concept t.a.v. PM_{10} gemiddeld 11 +/- 5% (95 percentiel) ten opzichte van de in de tunnel geëmitteerde hoeveelheid PM_{10} , waaruit volgt dat het reductie-effect ten opzichte van de totale hoeveelheid PM_{10} in de tunnel 7 +/- 3% is.
- Tijdens Fase 2 van de praktijkproef (met een schakelinterval van 24 uur) is het gemeten reductie-effect van het elektrostatisch concept t.a.v. PM_{10} gemiddeld 15 +/- 6% (95 percentiel) ten opzichte van de in de tunnel geëmitteerde hoeveelheid PM_{10} , waaruit volgt dat het reductie-effect ten opzichte van de totale hoeveelheid PM_{10} in de tunnel 9 +/- 4% is.
- Hoewel dit aspect niet uitputtend kon worden onderzocht lijkt de werking van het elektrostatisch concept gevoelig voor de relatieve luchtvochtigheid, waarbij een hogere luchtvochtigheid in de tunnel een gunstig effect heeft op het reductiepercentage. De relatieve luchtvochtigheid fluctueert echter samen met een aantal andere belangrijke parameters zoals de verkeersintensiteit en daarmee de concentratietoename in de tunnel. Het is daarom niet zeker dat het gevonden verband ook daadwerkelijk een gevolg is van de luchtvochtigheid.
- Het verschil in de gemiddelde reductie tussen Fase 1 en Fase 2 kan niet verklaard worden door de luchtvochtigheid, omdat deze tijdens Fase 1 gemiddeld gezien hoger was. Dit kan een aanwijzing zijn dat het systeem bij langdurige toepassing effectiever is dan bij kortstondige toepassing.
- De werking van het elektrostatisch concept t.a.v. $PM_{2.5}$ kon in deze studie niet vastgesteld worden vanwege het ontbreken van betrouwbare meetdata.

Toepasbaarheid

- De resultaten van deze studie gelden voor de Thomassentunnel in de zomer van 2009 bij de gekozen configuratie en zijn niet representatief voor de jaargemiddelde situatie en niet zonder meer toepasbaar op andere tunnels. Parameters zoals de verkeersintensiteit en samenstelling, tunnelconfiguratie en luchtvochtigheid kunnen van invloed zijn op het reductiepercentage.
- Indicatieve berekeningen laten zien dat de inzet van het elektrostatisch concept in de Thomassentunnel (met een jaargemiddelde effectiviteit van 10 tot 20 %) zou leiden tot een verlaging van het aantal overschrijdingsdagen met 1-2 dagen in 2008. Bij tunnels met een hogere verkeersintensiteit en achtergrondconcentratie (Beneluxtunnel, Coentunnel en Schipholtunnel) is de verlaging bij 10% reductie gemiddeld 4 dagen en bij 20% 7-11 dagen.
- Ter illustratie is ook het effect berekend van reductiepercentages van 40 en 60%. Dergelijke reductiepercentages worden genoemd door BAM/TUD op basis van voorlopige schattingen van de mogelijkheden van optimalisatie. Het aantal overschrijdingsdagen bij de Thomassentunnel in 2008 zal volgens de berekeningen dan afnemen met 4-6 dagen. Bij tunnels met een hogere verkeersintensiteit en achtergrondconcentratie (Beneluxtunnel, Coentunnel en Schipholtunnel) zou dit bij 40% oplopen tot 15-22 dagen en bij 60% tot 22-32 dagen.

De volgende aanbevelingen worden gedaan:

- Het huidige onderzoek toont aan dat er potentie is voor het elektrostatisch concept om fijn stof in tunnels af te vangen. Meer kennis over belangrijke onderdelen van het gehele proces is nodig om het systeem te optimaliseren. Dit geldt bijvoorbeeld voor de instelling van het elektrostatisch veld, de verandering van de ladingstoestand van de deeltjes als gevolg van het veld, het transport van geladen deeltjes door de lucht naar het scherm enzovoort. Zonder voldoende kennis over deze processen is het moeilijk om tot optimalisatie te komen.
- De werking van het systeem lijkt gevoelig voor de luchtvochtigheid. De relatieve luchtvochtigheid fluctueert echter samen met een aantal andere belangrijke parameters zoals

de verkeersintensiteit en daarmee de concentratietoename in de tunnel. Het is daarom niet zeker dat het gevonden verband met de luchtvochtigheid ook daadwerkelijk een gevolg is van de luchtvochtigheid. Het wordt aanbevolen om dit nader te onderzoeken.

- Om een representatieve schatting te krijgen van het effect van het systeem in een tunnel, moeten op verschillende momenten in het jaar metingen uitgevoerd worden.
- De in deze studie gekozen aanpak lijkt in grote lijnen goed te werken en te leiden tot relatief kleine onzekerheden. Het wordt aanbevolen om voor vergelijkbare proeven te onderzoeken of er verbeteringen in de aanpak mogelijk zijn.
- Om het effect van eventuele beïnvloeding van de metingen door het elektrostatisch concept in kaart te brengen, wordt aanbevolen om in een volgende meetcampagne de vergelijking tussen TEOM en LVS over een langere periode uit te voeren.

Referenties

Beijk, R., Hoogerbrugge R., Hafkenscheid, T.L., Van Arkel, F.Th., Stefess, G.C., Van der Meulen, A., Wesseling, J.P., Sauter, F.J., Albers, R.A.W., 2007. PM₁₀: Validatie en equivalentie 2006. RIVM rapport 680708001/2007.

Heijden, W.J. van der en Hooghwerff, J. 2009. Elektrostatisch afvangen van fijnstof. Het gebruik van een horizontale inlaat op een fijnstofmonitor. M+P Rapport M+P.DVS.08.07.1.

IPL, in ontwikkeling. Rapport IPL-7. IPL Database - archivering van alle binnen IPL verzamelde meetgegevens'.

Regeling van de Minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer van 8 november 2007, nr. LMV 2007.109578, houdende regels met betrekking tot het beoordelen van de luchtkwaliteit (Regeling beoordeling luchtkwaliteit 2007) (versie oktober 2009)

Velders, G.J.M., Aben, J.M.M., Blom, W.F., Dam, J.D., Elzenga, H.E., Geilenkirchen, G.P., Hammigh, P., Hoen, A., Jimmink, B.A., Koelemeijer, R.B.A., Matthijsen, J., Peek, C.J., Schilderman, C.B.W., Sluis, O.C. van der and Vries, W.J. de, 2008. Concentratiekaarten voor grootschalige luchtverontreiniging in Nederland, Rapportage 2008. Report (in Dutch) 500088002/2008, Netherlands Environmental Assessment Agency, Bilthoven. (<http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/500088002.pdf>)

Bijlage A Meetsystemen

Fijn stof: LVS

Met de Low Volume Sampler (LVS) wordt stof op een filter verzameld. Dit is de referentiemethode voor het meten van fijn stof conform NEN-EN 12341. De voorafscheiding bepaalt welke fractie van fijn stof wordt bemonsterd. In deze studie zijn met LVS-apparaten van het merk Derenda PM₁₀ concentraties gemeten.

Bij referentiemetingen wordt een filter gedurende 24 uur bemonsterd. In deze studie is vanaf 26 augustus 2009 overgegaan bemonstering van 12 uur, om meer data te genereren. Met een automatische filterwisselaar kunnen 15 monsters achtereen genomen worden. De filters worden in het instrument gekoeld bewaard om verdamping van vluchtige aerosolen tegen te gaan. De filters van de LVS zijn gewogen in het laboratorium bij Müller-BBM in München. De massaconcentratie volgt uit de verschilweging tussen het onbeladen en beladen filter en het aanzuigdebiet.

Fijn stof: GRIMM

De werking van de GRIMM berust op een optisch meetprincipe, waarbij lichtverstrooiing van een deeltje een maat is voor de grootte van het deeltje. Met de GRIMM kunnen deeltjes gedetecteerd worden tussen 0.25 en 32 µm. De GRIMM werkt met 31 verschillende grootteklassen.

Er zijn verschillende uitvoeringen van de GRIMM monitor in gebruik. In deze studie is gebruik gemaakt van de Environcheck (GRIMM#365), 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 Environcheck voor dit onderzoek 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 ontvochtingssysteem en een geïntegreerde ontvochtiger (permeatiedroger). De inlaat wordt niet verwarmd.

In de gebruikte configuratie worden de tellingen door de Environcheck direct omgezet in de massaconcentraties PM₁, PM_{2.5} en PM₁₀. Het was niet mogelijk om de verdeling van deeltjesaantallen over grootteklassen te meten. De manier waarop de omzetting van deeltjes naar massa plaatsvindt wordt door de fabrikant niet vrijgegeven.

Fijn stof: TEOM

De TEOM maakt gebruik van een oscillerend filter. Door het verzamelen van stof op het filter verandert de eigenfrequentie van het filter, waaruit de massaverandering bepaald kan worden en daarmee de concentratie. Voor de PM₁₀-metingen is gebruik gemaakt van TEOM's, type 1400AB van Thermo.

De inlaattemperatuur is 50°C. De voorafscheiding bepaalt welke fractie van fijn stof wordt bemonsterd. In deze studie zijn de TEOM's uitgerust met een PM₁₀-inlaatkop.

NO_x: Airpointer

Voor NO_x- en NO₂-metingen is gebruik gemaakt van een continue systeem gebaseerd op chemieluminescentie van het type Airpointer van fabrikant Recordum. De Airpointer is ontworpen voor 'Hot Spot' metingen of voor metingen op plaatsen waar geen conventionele meetstations kunnen worden opgesteld. De Airpointer biedt dezelfde mogelijkheden als een traditioneel meetstation, maar dan in een kleine behuizing. De compacte vorm doet geen afbreuk aan de nauwkeurigheid doordat de meettechnieken voorgeschreven door de EU-regelgeving gebruikt worden.

Belangrijkste eigenschappen van de Airpointers:

- een NO_x-module conform EN 14211 van het merk Thermo
- de interne automatische zero drift calibrator (waarbij dagelijks de zero drift gekalibreerd wordt)
- de uitgebalanceerde koelunit, wat de stabiliteit van het meetsignaal ten goede komt

Meteorologie

Op het meetpunt buiten is gebruik gemaakt van een Vaisala WXT520 weerstation (voor temperatuur, luchtvochtigheid, luchtdruk, windrichting, windsnelheid en neerslag). De windrichting en windsnelheid worden ultrasoon gemeten.

Op de meetpunten in de tunnel zijn temperatuur en luchtvochtigheid door de meetapparaten voor fijn stof en NO_x gemeten. Daarnaast zijn windsnelheid en -richting gemeten met Windsonic Gill windmeters.

In verband met ontbrekende data is de dataset die gebruikt is voor de relatieve luchtvochtigheid in de tunnel op meetpunt 3 vervangen door meetdata van de BAM. De BAM data geven een nagenoeg 1 op 1 vergelijking met de aanwezige data gemeten door de GRIMM op meetpunt 3.

Meetopstelling in de tunnel en buiten

Figuur 13 laat ter indicatie de meetopstelling zien op meetpunt 1 aan het begin van de proef. Later is daar nog een TEOM bijgeplaatst.



Figuur 13: Foto van de meetopstelling op meetpunt 1 aan het begin van de proef. Van links naar rechts: GRIMM, Airpointer, LVS, CPC (BAM/TU Delft)

Een foto van het buitenmeetpunt staat in Figuur 14.



Figuur 14: Het buitenmeetpunt (GRIMM en meteorologie)

Verkeer

Bij de tunnelingang is boven de rijbanen een verkeersteller geïnstalleerd (zie Figuur 15). Met de verkeersteller, de Oostenrijkse Smart Eye Traffic Data Sensor, wordt gelijktijdig per voertuigcategorie de gemiddelde rijnsnelheid en intensiteit voor de afzonderlijke rijstroken bepaald. De voertuigcategorieën betreffen personenvoertuigen en vrachtwagens/bussen.



Figuur 15: Positie verkeerstellers aan het plafond bij de tunnelingang

Actieve en passieve rekken van het elektrostatisch concept



Figuur 16: Foto van de Thomassentunnel met daarin links het actieve rek en rechts het passieve rek gemonteerd.

Bijlage B GRIMM metingen

Between sampler vergelijkbaarheid

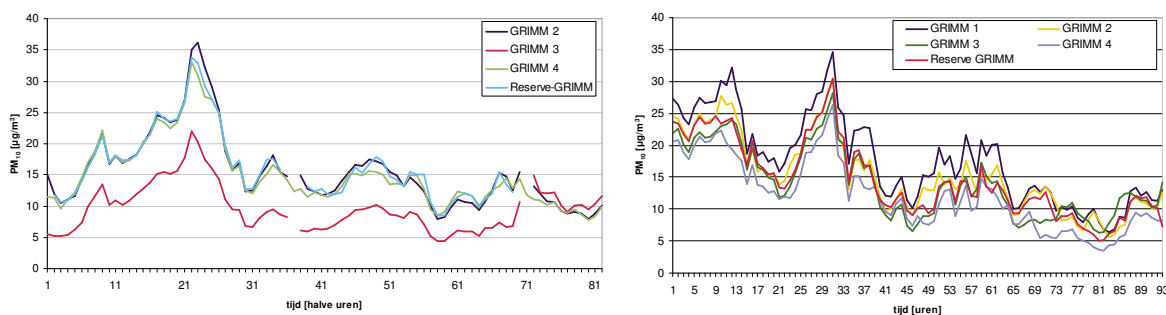
Voorafgaand aan de praktijkproef hebben de vier ingezette GRIMM's enkele dagen naast elkaar gemeten om de vergelijkbaarheid te bepalen. De meetperiode was van 6 tot 12 maart 2009 en de locatie was de IPL proeftuin "Schermen" langs de A28 bij Nulde.

Uit de vergelijkende metingen blijkt dat de between sampler onzekerheid voor de PM_{10} -concentratie en de $PM_{2,5}$ -concentratie kleiner is dan 2% en daarmee niet significant (Van der Heijden en Hoogwerff, 2009).

Tijdens de praktijkproef bleek dat de volgorde in concentratieniveau van de GRIMM's in de tunnel niet altijd overeenkwam met de verwachting ($GRIMM\ 1 < GRIMM\ 2 < GRIMM\ 3$). Daarom zijn tussentijdse vergelijkingsmetingen uitgevoerd op 16 en 17 juni 2009. De GRIMM's stonden die dagen naast elkaar op meetpunt 4 (buiten de tunnel). De GRIMM op meetpunt 1 was kort daarvoor in storing geraakt. In plaats daarvan is een reserve GRIMM ingezet tijdens de vergelijking en aansluitend ook in de tunnel.

Uit de vergelijkende metingen (zie Figuur 17) blijkt dat de GRIMM's nog steeds goed vergelijkbaar zijn, behalve GRIMM 3. Deze gaf een ruim 30% lagere concentratie. De oorzaak was vervuiling in het apparaat. Na het schoonmaken met perslucht gaf de GRIMM weer goede resultaten.

Vanaf dat moment is iedere twee weken een schoonmaakactie aan de GRIMM's uitgevoerd om de drift binnen de perken te houden.



Figuur 17: Vergelijkende PM_{10} metingen met de GRIMM monitoren. Links: tussentijds, rechts: na afloop van de proef.

Na afloop zijn de GRIMM's die in de tunnel hebben gemeten op het meetpunt buiten naast de GRIMM gezet. Ook heeft de reserve GRIMM daar meegedraaid in de vergelijkende metingen. Deze vonden plaats van 4 tot 8 september 2009. De concentratiemetingen van PM_{10} zijn weergegeven in Figuur 17. Het blijkt dat de GRIMM's behoorlijk van elkaar verschillen (voor zowel PM_{10} en PM_{25} meer dan 5%). De GRIMM die buiten heeft gemeten gaf het laagste niveau, de GRIMM op meetpunt 1 het hoogste. Dit beeld werd bevestigd door onderzoek bij de leverancier waarbij de GRIMM's vergeleken zijn met een referentie GRIMM.

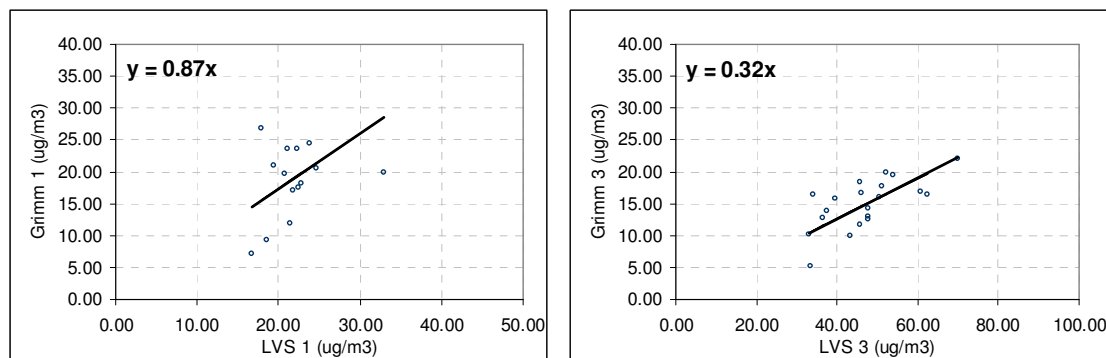
Vergelijking met LVS

Om de betrouwbaarheid van de meetdata van de GRIMM te toetsen worden de gemeten PM_{10} concentraties vergeleken met de metingen van de LVS. Daarbij worden verschillende perioden onderscheiden:

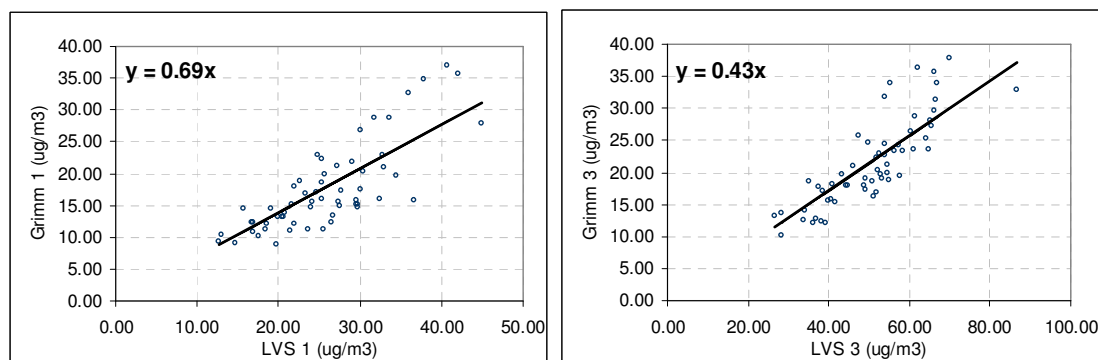
- tot 15 juni 2009: voor de schoonmaak van de GRIMM's
- 15 juni tot 19 augustus 2009: na de schoonmaak van de GRIMM's

- 20 augustus tot 5 september 2009: bij schakelinterval 24 uur

In Figuur 18 (voor de schoonmaak) en Figuur 19 (na de schoonmaak) is de vergelijking weergegeven op basis van orthogonale regressie. Ter illustratie is de regressie door de oorsprong geforceerd, ook al was er wel een significant intercept.



Figuur 18: Vergelijking 24-uur GRIMM –LVS PM₁₀ voor de schoonmaak d.m.v. orthogonale regressie geforceerd door de oorsprong. Links: meetpunt 1, rechts: meetpunt 3.

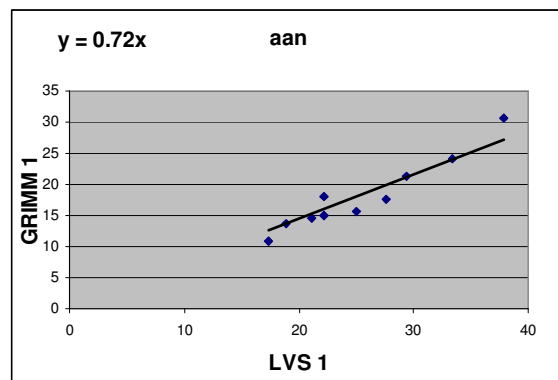
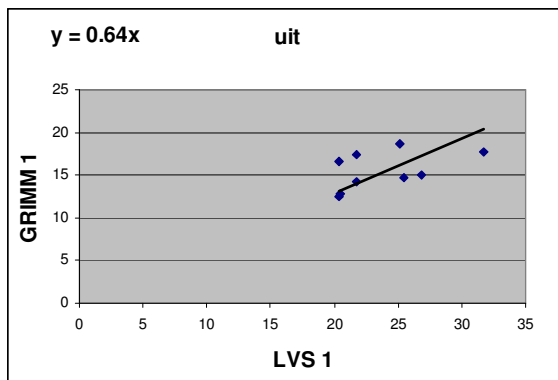


Figuur 19: Vergelijking 24-uur GRIMM –LVS PM₁₀ na de schoonmaak d.m.v. orthogonale regressie geforceerd door de oorsprong. Links: meetpunt 1, rechts: meetpunt 3.

Voor de periode voor de schoonmaak zijn slechts weinig datapunten beschikbaar. Dat vertekent het beeld enigszins. De GRIMM op meetpunt 3 geeft voor de schoonmaak slechts eenderde van de concentratie van de LVS aan. Op meetpunt 1 liggen de GRIMM en LVS dicht bij elkaar, hoewel ook daar een grote spreiding optreedt.

Na het schoonmaken blijft de concentratie gemeten met de GRIMM op meetpunt 3 een laag percentage van de concentratie gemeten met de LVS (ca 43%). Op meetpunt 1 is het percentage veel hoger, rond de 70%. Ook is de afwijking van de gemiddelde hellingshoek voor de individuele datapunten op beide meetpunten soms aanzienlijk.

Bij een schakelinterval van 24 uur (20 augustus tot en met) kan onderzocht worden of de vergelijking met de LVS afhankelijk is van het aan of uit staan van het systeem van het elektrostatisch concept. Vanwege afwisselende storingen in de LVS en de GRIMM op meetpunt 3 vanaf 20 augustus 2009 zijn slechts data beschikbaar voor meetpunt 1 (in de periode 20 augustus tot en met 1 september 12:00 GMT). Uit Figuur 20 blijkt dat er een klein verschil is tussen een uitgeschakeld en aangeschakeld systeem. De spreiding is bij een uitgeschakeld systeem groter dan bij een aangeschakeld systeem. Vanwege het geringe aantal datapunten kunnen hier geen conclusies aan verbonden worden.



Figuur 20: Vergelijking 24 en 12-uur GRIMM –LVS PM10 bij een schakelinterval van 24 uur d.m.v. lineaire regressie voor meetpunt 1 (vanwege klein aantal datapunten door oorsprong geforceerd tbv vergelijking). Links: uitgeschakeld systeem, Rechts: aangeschakeld systeem. NB: de figuur kon niet gemaakt worden met Regressietool ivm te weinig datapunten.

Bijlage C Between sampler vergelijkbaarheid

TEOM

- Voorafgaand aan de inzet in de tunnel zijn de TEOM's op het lab van ETS (leverancier TEOM) met elkaar vergeleken. Daar zijn echter geen data van beschikbaar. De between sampler onzekerheid kan dus niet vastgesteld worden, maar aangezien de monitoren op het laboratorium met elkaar vergeleken zijn, mag aangenomen worden dat ze pas ingezet zijn wanneer ze voldoen aan de gestelde criteria. De between sampler onzekerheid ligt daarom waarschijnlijk onder de 5%.
- Na afloop van de proef hebben de TEOM's naast elkaar in de werkplaats van M+P gemeten, zonder de sample-filters eerst te vervangen. In de werkplaats is de stofconcentratie waarschijnlijk niet homogeen verdeeld, zodat de vergelijking tussen de monitoren slechts een indicatie geeft van de between sampler onzekerheid. Ten opzichte van de TEOM van meetpunt 3 was de met de TEOM van meetpunt 1 gemeten concentratie 7% hoger en die op meetpunt 2 10% hoger.
- De onderlinge verschillen tussen de TEOM's zorgen in de analyse van de werkzaamheid van het elektrostatisch concept niet voor grote onzekerheden, omdat de analyse gebaseerd is op de verschillen tussen elkaar afwisselende aan en uit intervallen. Dat de concentratieopbouw van PM_{10} in de tunnel niet exact de juiste grootte heeft verstoort de analyse niet.

LVS

De ingezette LVS units zijn niet met elkaar vergeleken. De standaard procedures voor kwaliteitsborging zijn gevolgd (volgens EN-NEN 12341), zodat de between sampler vergelijkbaarheid optimaal gewaarborgd is.

NO_x

- Voorafgaand aan de inzet in de tunnel zijn de Airpointers niet met elkaar vergeleken.
- Tijdens de metingen in de Thomassentunnel zijn de standaard procedures voor kwaliteitsborging gevolgd. Verificaties en/of kalibraties zijn minimaal eens per maand uitgevoerd. Als de met de monitor gemeten concentratie meer dan 10% afwijkt van het kalibratiegas wordt de monitor bijgesteld (kalibratie). Indien het verschil kleiner is vindt er geen afstelling plaats (verificatie). Tijdens de meetcampagne zijn de monitoren op meetpunten 1 en 3 na de kalibratie aan het begin nog twee maal gekalibreerd, waarvan een keer tijdens Fase 1 (op 6 augustus 2009). In Fase 2 bleek een kalibratie niet nodig. Wel was het zo dat de Airpointer op meetpunt 3 vanaf 6 augustus hogere concentraties is gaan meten (tot 3%) en de monitor op meetpunt 1 lagere (tot 6%). De Airpointer op meetpunt 2 is na de kalibratie na installatie niet meer gekalibreerd. Deze monitor is in de maand na installatie lagere concentraties gaan meten (tot 5%).
- Na afloop van de proef hebben de Airpointers naast elkaar in de werkplaats van M+P gemeten, zonder eerst een kalibratie uit te voeren. Ten opzichte van de Airpointer van meetpunt 3 was de met de Airpointer van meetpunt 1 gemeten concentratie 11% lager en die op meetpunt 2 13% lager.
- De onderlinge verschillen tussen de Airpointers zorgen in de analyse van de werkzaamheid van het elektrostatisch concept niet voor grote onzekerheden, omdat de analyse gebaseerd is op de verschillen tussen elkaar afwisselende aan en uit intervallen. Dat de concentratieopbouw van NO_x in de tunnel niet exact de juiste grootte heeft verstoort de analyse niet.

Bijlage D Onderzoek naar beïnvloeding van metingen door het elektrostatisch concept

De volgende hypothesen (nul-hypothesen) zijn onderzocht:

- 1. Er is geen significant verschil tussen de toename van de concentratie van NO_x in de tunnel tijdens perioden met een aangeschakeld systeem en perioden met een uitgeschakeld systeem.**

Uit Tabel 5 blijkt dat er een minimaal verschil is tussen de ΔNO_x bij een uit- en aangeschakeld systeem. In Fase 1 is de concentratietoename bij *aan* intervallen $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.2%) lager dan bij *uit* intervallen. In Fase 2 is de concentratietoename bij *aan* intervallen $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.6%) hoger dan bij *uit* intervallen.

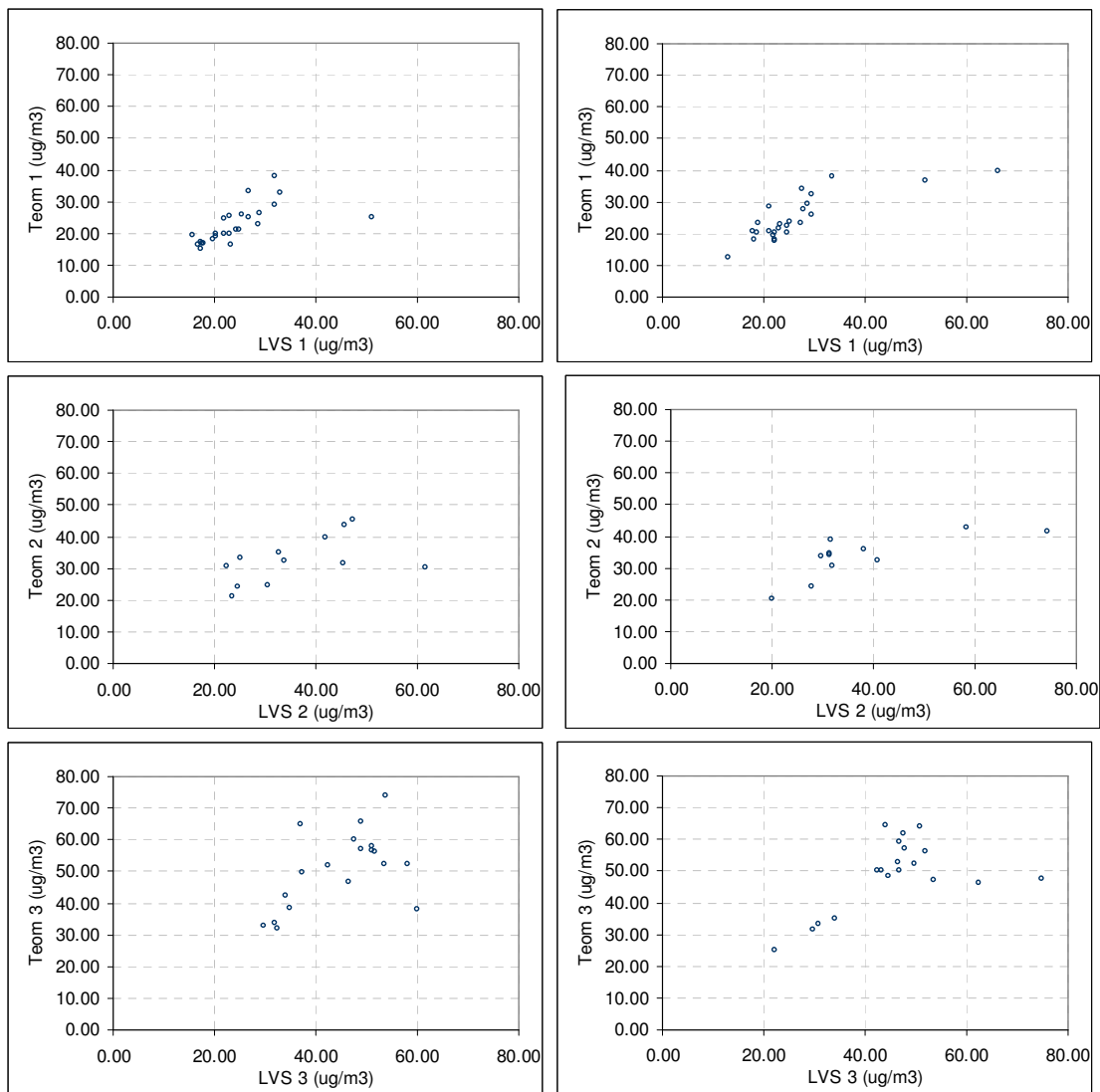
De onzekerheid in het verschil is bepaald door middel van de Student t-test. Deze onzekerheid is $\sigma\sqrt{2/n}$ en ligt voor zowel Fase 1 als Fase 2 in de orde van $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Om te toetsen binnen 95% betrouwbaarheid moet de onzekerheid vermenigvuldigd worden met een t-waarde van 1.64 (eenzijdige toets), zodat het in de orde van $30\text{-}35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ligt. De onzekerheid in het verschil is dus groter dan het verschil zelf. De verschillen in de toename van de concentratie van NO_x tussen een uit- en aangeschakeld systeem zijn dus niet significant. De nul-hypothese wordt niet verworpen.

Tabel 5: Gegevens voor statistische toets voor NO_x

	Fase 1		Fase 2	
	uit	aan	uit	aan
Gemiddeld ΔNO_x ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	525	524	505	513
$\sigma\sqrt{2/n}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	22	22	20	21
$t*\sigma\sqrt{2/n}$ (t=1.64 eenzijdige toets 95% betrouwbaarheid) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	36	36	33	34

- 2. De TEOM metingen verhouden zich tot de LVS metingen tijdens perioden met een aangeschakeld systeem niet significant anders dan tijdens perioden met een uitgeschakeld systeem.**

Of er sprake is van beïnvloeding door het elektrostatisch concept wordt onderzocht op basis van data uit Fase 2 (vanaf 26 augustus) waarin het schakelinterval 24 uur was. Op die manier vallen de LVS-metintervallen (vanaf 26 augustus van 12 uur) binnen een periode waarin het systeem *uit* of *aan* geschakeld was. De vergelijking tussen de TEOM en LVS in Fase 2 is gegeven in Figuur 21 en de bijbehorende regressiecoëfficiënten staan in Tabel 6. Het aantal datapunten voor meetlocatie 2 en 3 is beperkt wegens niet goed functioneren van de TEOM's (zie paragraaf 4.3) en het ontbreken van LVS data op meetpunt 2 tussen 26 augustus en 3 september.



Figuur 21: Vergelijking 12-uur TEOM –LVS PM₁₀ bij een schakelinterval van 24 uur d.m.v. orthogonale regressie. Boven: meetpunt 1, midden: meetpunt 2, onder: meetpunt 3. Links: uitgeschakeld systeem, Rechts: aangeschakeld systeem.

Tabel 6 Regressiecoëfficiënten en onzekerheden daarin (2σ) behorend bij Figuur 21.

	Geforceerd door oorsprong		Met intercept	
Uit	helling		helling	intercept
Meetpunt 1	0.92 +/- 0.09		0.68 +/- 0.26	6.02 +/- 6.50
Meetpunt 2	0.88 +/- 0.14		0.42 +/- 0.34	17.56 +/- 12.69
Meetpunt 3	1.14 +/- 0.11		1.51 +/- 0.51	-17.11 +/- 23.44
Aan	helling		helling	intercept
Meetpunt 1	0.90 +/- 0.09		0.57 +/- 0.16	9.66 +/- 4.52
Meetpunt 2	0.84 +/- 0.14		0.35 +/- 0.19	20.35 +/- 7.84
Meetpunt 3	1.07 +/- 0.11		0.91 +/- 0.38	7.43 +/- 18.09

Uit Figuur 21 en Tabel 6 valt het volgende op:

- De intercepten bij meetpunt 2 zijn significant binnen het 95% betrouwbaarheidsinterval. Bij meetpunt 1 is het intercept alleen significant voor een aangeschakeld systeem.
- De hellingshoeken (zonder intercept) liggen in de buurt van 1, maar verschillen wel van elkaar. Op meetpunt 3 is de hellingshoek groter dan 1. Dat is opmerkelijk, omdat de TEOM normaal gesproken een lagere concentratie meet (door vervluchtiging en verdamping). De verschillen tussen de meetpunten zouden kunnen komen door verschillen in samenstelling van het fijn stof op de meetpunten. Gemiddeld over alle dagen, verdubbelt de gemeten concentratie gaande van meetpunt 1 naar 3. Op weekdagen is de stijging nog groter. Dat betekent dat het fijn stof op meetpunt 3 voor ruim de helft uit vers geëmitteerd aerosol bestaat. Het valt niet uit te sluiten dat de TEOM afwijkend reageert op dit aerosol. Overigens is het feit dat de TEOM's zich op de verschillende meetpunten verschillend verhouden tot de LVS geen belemmering voor het onderzoek.
- Wat wel van belang is is of de verhouding tot de LVS verschilt tussen de aan en uit intervallen. De onzekerheden in de regressiecoëfficiënten zijn vrij groot. Mede daardoor is het verschil tussen de regressiecoëfficiënten op geen van de meetpunten significant binnen het 95% betrouwbaarheidsinterval.
- Opvallend aan zowel de figuren voor een uitgeschakeld en aangeschakeld systeem is de grote spreiding in de vergelijking tussen TEOM en LVS. Een aantal punten in deze figuren geeft zelfs een zeer groot verschil tussen de concentratie gemeten met de TEOM en die met de LVS. De TEOM concentraties zijn veel lager dan de zeer hoge concentraties gemeten met de LVS. Nader onderzoek laat zien dat deze hoge concentraties op alle meetpunten in de tunnel voorkomen en dat ze alle in één weekeinde vallen. In het bewuste weekeinde (19 en 20 september) was de achtergrondconcentratie van PM10 hoog. Omdat de verkeersintensiteit in het weekeinde lager is dan op werkdagen, nam de concentratie in de tunnel relatief gezien maar weinig toe. Het fijn stof in de tunnel bestond op alle meetpunten dus voornamelijk uit aerosol dat van buitenaf de tunnel in getransporteerd is. Een verklaring voor de afwijkende punten zou dus kunnen zijn dat de TEOM anders reageert op fijn stof van buiten. Het is duidelijk dat deze meetwaarden een grote invloed hebben op de regressiecoëfficiënten en de onzekerheid daarin. Verder valt op dat dergelijke meetpunten ook gevonden worden in de perioden dat het systeem niet werkte (de linkse figuren) De afwijkende waarden lijken dus niet heel duidelijk samen te hangen met de werking van het systeem.

De hellingscoëfficiënten zijn op zowel meetpunt 2 als 3 lager wanneer het elektrostatisch concept aangeschakeld is. Dit zou een indicatie kunnen zijn dat er inderdaad een systematische beïnvloeding plaatsvindt. Om de nul-hypothese statistisch te toetsen wordt gekeken naar meetpunt 3 omdat er in vergelijking met meetpunt 2 meer datapunten beschikbaar zijn. Aangezien het aantal datapunten beperkt is tot 20 kunnen de regressiecoëfficiënten onevenredig beïnvloed worden door de waarnemingen in het weekeinde van 19 en 20 september (zie hierboven). De regressie is dan ook opnieuw gedaan voor meetpunt 3, waarbij de waarnemingen buiten het 95% betrouwbaarheidsinterval niet zijn meegenomen. De resultaten staan in Tabel 7.

Tabel 7: Regressiecoëfficiënten en onzekerheden daarin (2σ) voor de vergelijking tussen TEOM en LVS op meetpunt 3.

	Alle data		Data binnen 95% betrouwbaarheidsinterval	
	helling	n	helling	n
Uit	1.14 +/- 0.11	20	1.15 +/- 0.08	18
Aan	1.07 +/- 0.11	20	1.12 +/- 0.09	17

De uitbijters blijken inderdaad een grote invloed te hebben. De statistische toets wordt gedaan op beide datasets (met en zonder de uitbijters). In de bepaling van het effect wordt gebruik gemaakt van de verhouding $\Delta C_{aan}/\Delta C_{uit}$. De toets is erop gericht om vast te stellen of deze gemiddelde verhouding significant afwijkt van 1. Uit Tabel 8 blijkt dat:

- bij alle data het verschil tussen de gemiddelde verhouding en 1 gelijk is aan 0.0647. Dit verschil is groter dan de waarde waarbinnen geen significant verschil aangetoond wordt (0.0384). De nul-hypothese kan op basis van de complete dataset niet worden verworpen.
- bij de data binnen het 95% betrouwbaarheidsinterval het verschil tussen de gemiddelde verhouding en 1 gelijk is aan 0.0263. Dit verschil is kleiner dan de waarde waarbinnen geen significant verschil aangetoond wordt (0.0289). De nul-hypothese zou op basis van de dataset binnen het 95% betrouwbaarheidsinterval worden verworpen.

Het is onbevredigend dat de significantie van het verschil tussen aan en uit zo sterk samenhangt met het al dan niet meenemen van uitbijters. Duidelijk is dat het aantal metingen te beperkt is voor een goede analyse van deze onzekerheid in de vaststelling van het effect.

Wanneer het verschil in meting tussen TEOM en LVS bij een werkend en niet werkend systeem nauwkeurig bepaald kon worden zou deze waarde als correctie kunnen worden gebruikt en zou de onzekerheid in de correctie opgeteld moeten worden bij de nu al berekende onzekerheid. Dit is echter niet het geval.

Het is ook niet terecht om deze onzekerheid in zijn geheel mee te nemen in de onzekerheid in het gemeten effect van het elektrostatisch concept. Een gedeelte van de ruis in bovenstaande figuren hangt samen met de kwaliteit van de LVS (en TEOM) metingen. Deze zouden niet terug mogen komen in de onzekerheid van de werking van het elektrostatisch concept.

Concluderend:

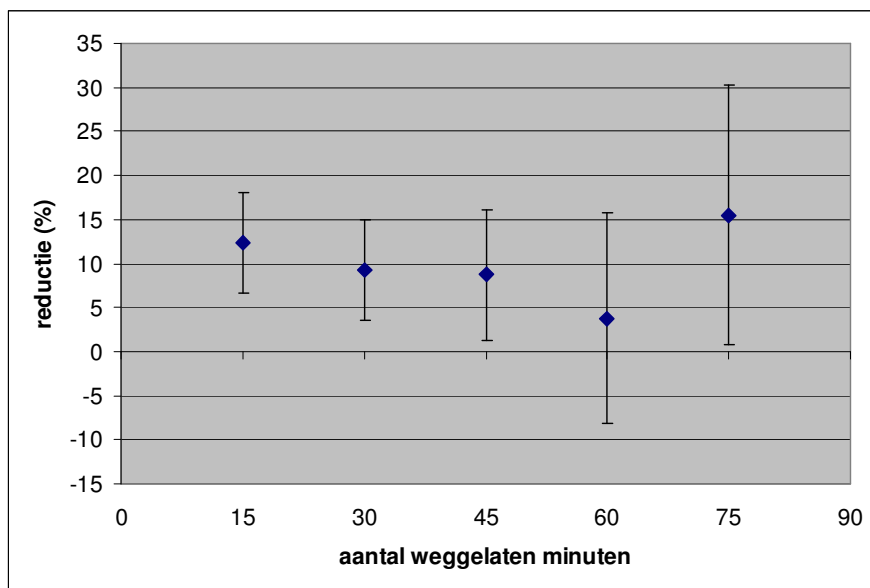
- Systematische beïnvloeding van de metingen door het elektrostatisch concept zou ten onrechte worden geïnterpreteerd als een effect (of juist een negatief effect afhankelijk van de richting van de beïnvloeding). Het is daarom van het grootste belang om dit aspect goed in kaart te brengen.
- De vergelijking tussen de TEOM en LVS geeft een indicatie dat de metingen met de TEOM beïnvloed kunnen zijn door het elektrostatisch concept. Het kan daarbij gaan om beïnvloeding ter grootte van enkele procenten.
- Door het beperkte aantal metingen en de kwaliteit daarvan kan deze indicatie (hypothese) bevestigd noch verworpen worden.
- Het is op basis van de huidige meetdata niet mogelijk om tot een correctie dan wel betrouwbare schatting van de onzekerheid als gevolg van deze beïnvloeding te komen. In de in deze studie gepresenteerde reductiepercentages en de bijbehorende onzekerheid is dus vooralsnog geen rekening gehouden met deze beïnvloeding.

Tabel 8: Gegevens voor statistische toets voor TEOM-LVS op meetpunt 3

	Alle data	Data binnen 95% betrouwbaarheidsinterval (uitbijters verwijderd)
Gemiddelde helling _{aan} /helling _{uit}	0.9353	0.9737
1 σ onzekerheid	0.0696	0.0497
$\sigma\sqrt{2/n}$ (waarbij n=18)	0.0220	0.0166
t* $\sigma\sqrt{2/n}$ (t=1.64 eenzijdige toets 95% betrouwbaarheid)	0.0384	0.0289
Verskil tussen gemiddelde en 1	1-0.9353=0.0647	1-0.9737=0.0263

Bijlage E Invloed van uitsluiten van minuten aan begin van de 100 minuten intervallen

De analyse van de effectiviteit van het elektrostatisch concept is gebaseerd op intervallen waarvan de eerste 15 minuten buiten beschouwing zijn gelaten vanwege opstart/naijleffecten. De verwachting was dat het effect groter zou zijn als er meer minuten weggelaten zouden worden. Opstart- en naijleffecten hebben dan immers minder invloed. Figuur 22 toont de afhankelijkheid van het effect van het aantal minuten dat wordt weggelaten aan het begin van het interval.



Figuur 22: Het gemiddelde reductie-effect (en 2σ onzekerheid) als functie van het aantal minuten dat in het interval buiten beschouwing wordt gelaten.

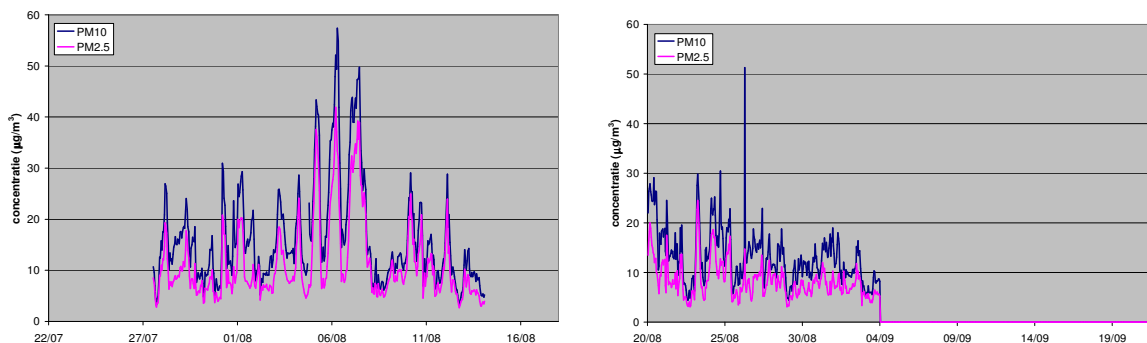
Uit Figuur 22 wordt het volgende afgeleid:

- Hoe meer minuten weggelaten worden, hoe groter de onzekerheid in het gemiddelde effect is.
- Ten opzichte van de 15 minuten die standaard zijn gekozen om het effect te bepalen, wordt het gemiddelde effect in eerste instantie verlaagd als de intervallen korter worden gekozen. Pas bij een intervallengte van 25 minuten (100-75) is het effect groter, maar gezien de onzekerheid niet significant verschillend.
- Op een tijdschaal van 100 minuten geven deze resultaten geen aanwijzing dat het aantal weg te laten minuten verkeerd is gekozen.
- De resultaten geven aan dat er veel variatie zit in het gemiddelde effect als de intervallengte in de analyse anders wordt gekozen. Dit wordt geïnterpreteerd als ruis.
- De orde grootte van het effect van 10% blijft van kracht.

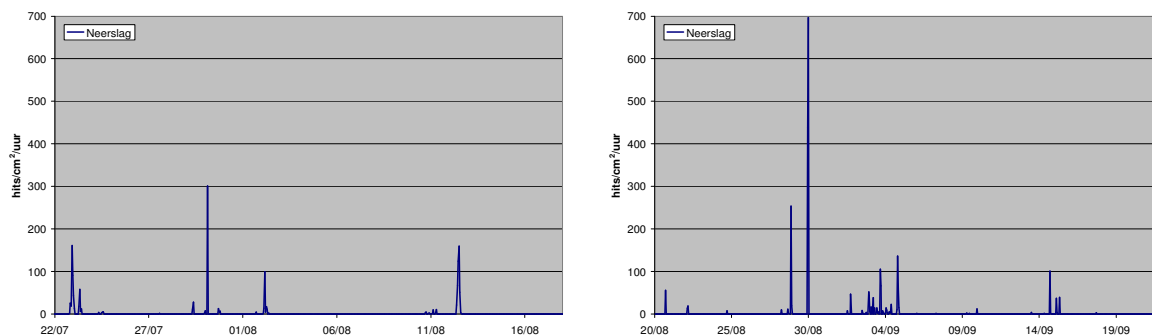
Bijlage F Omstandigheden in de buitenlucht

In Figuur 23 tot en met Figuur 26 staan de tijdseries van de uurgemiddelde fijnstofconcentraties (PM₁₀ en PM_{2,5}), neerslag, luchtvochtigheid, temperatuur, windrichting en windsnelheid in de buitenlucht in Fase 1 en 2.

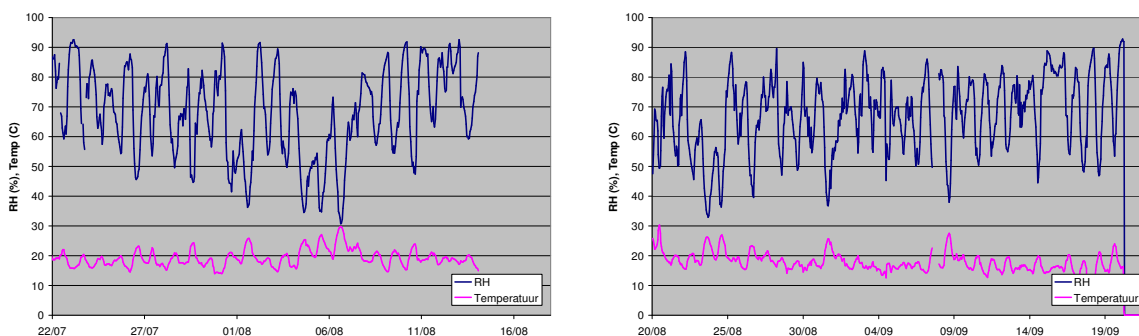
In Fase 1 ontbreken tot halverwege 27 juli 2009 de fijnstofdata omdat de metingen niet betrouwbaar waren als gevolg van een onbekende storing in de GRIMM. Van 14 tot en met 18 augustus 2009 ontbreken alle data, in verband met een storing van de logging van de signalen. In Fase 2 zijn 4 september de metingen van fijn stof in de buitenlucht gestopt.



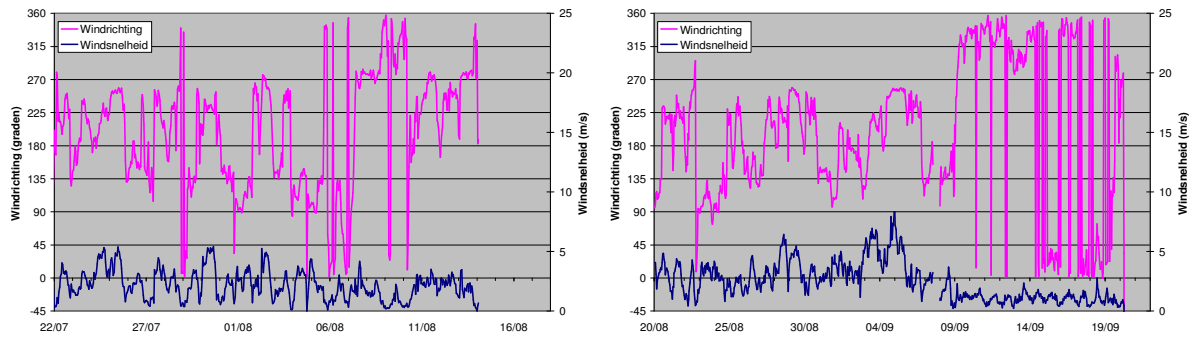
Figuur 23: Concentratie van PM₁₀ en PM_{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) gemeten met de GRIMM op meetpunt 4 tijdens Fase 1 (links) en Fase 2 (rechts).



Figuur 24: Indicatieve neerslagintensiteit ($\text{hits}/\text{cm}^2/\text{uur}$) gemeten op meetpunt 4 tijdens Fase 1 (links) en Fase 2 (rechts). De eenheid betreft de telling van de individuele regendruppels.

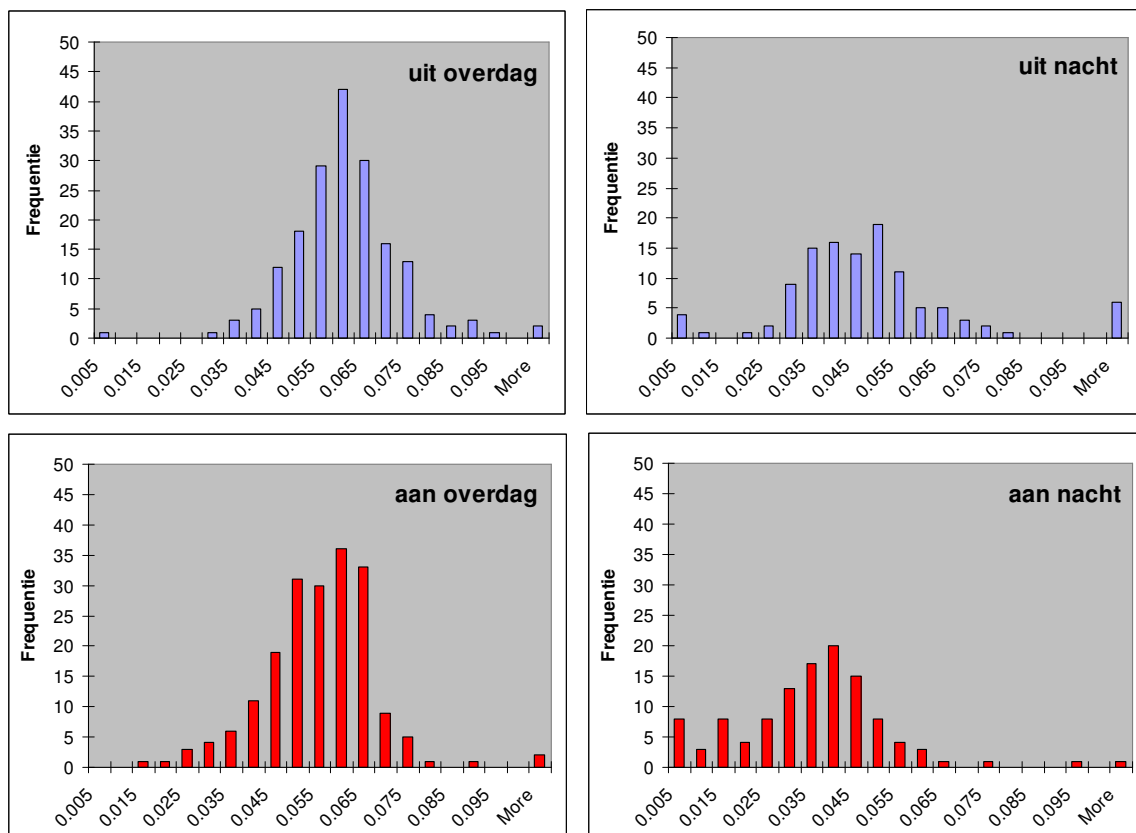


Figuur 25: Relatieve luchtvochtigheid (%) en temperatuur ($^{\circ}\text{C}$) gemeten op meetpunt 4 tijdens Fase 1 (links) en Fase 2 (rechts).

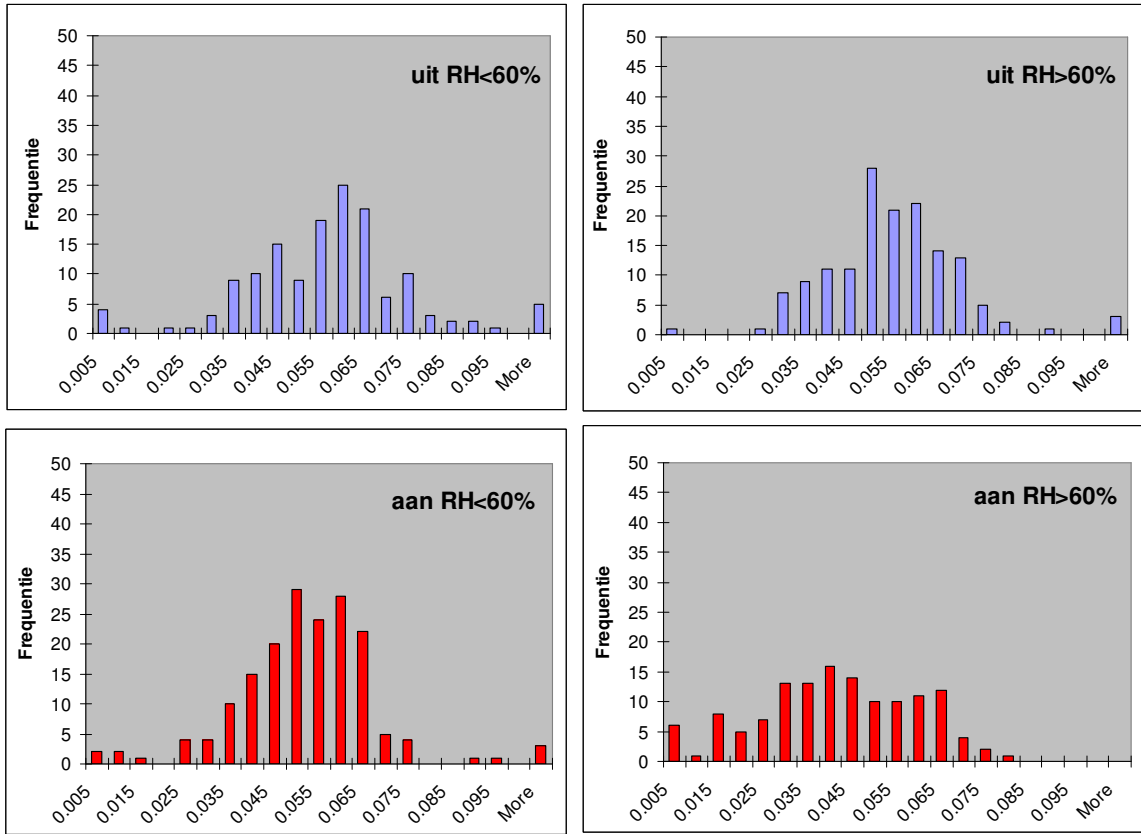


Figuur 26: Windrichting (graden) en -snelheid (m/s) gemeten op meetpunt 4 tijdens Fase 1 (links) en Fase 2 (rechts).

Bijlage G Verdelingen uit Fase 2



Figuur 27: Verdeling van de verhouding $\Delta PM_{10}/\Delta NO_x$ over de intervallen in Fase 2, waarbij een onderscheid is gemaakt tussen de uren overdag (tussen 04:00-18:00 GMT) en nacht.
 Links: *overdag* intervallen, rechts: *nacht* intervallen. Boven: *uit* intervallen, Onder: *aan* intervallen.



Figuur 28: Verdeling van de verhouding $\Delta\text{PM}_{10}/\Delta\text{NO}_x$ over de intervallen in Fase 2, waarbij een onderscheid is gemaakt tussen de uren waarbij de luchtvochtigheid (RH) lager was dan 60% en uren waarbij de luchtvochtigheid hoger was dan 60%.
 Links: $\text{RH} < 60\%$ intervallen, rechts: $\text{RH} > 60\%$ intervallen. Boven: *uit* intervallen, Onder: *aan* intervallen.

Bijlage H Rapportage TU Delft & BAM

Bijlage is digitaal opgenomen op de CD achterin het rapport.

Bijlage I Gezondheidsnotitie (TU Delft & BAM)

Bijlage is digitaal opgenomen op de CD achterin het rapport.

Bijlage J Elektrische veiligheid van het concept (KEMA)

Bijlage is digitaal opgenomen op de CD achterin het rapport.

Bijlage K Testen van de meetapparatuur voorafgaand aan de proef (M+P)

Bijlage is digitaal opgenomen op de CD achterin het rapport.

Bijlage L Berekening bij tunnelmonden(TNO)

Bijlage is digitaal opgenomen op de CD achterin het rapport.