

Optimalisatie FDRS (Elektrostatisch concept)

2 november 2009

Projectnummer I00147
Project Fijn stof proef Thomassentunnel

Auteurs Technische Universiteit Delft, Faculteit Technische Natuurwetenschappen, afdeling
Biotechnologie, Sectie Botanische Tuin, Julianalaan 67, 2628 BC Delft, Nederland
- W.N.J. Ursem
- J.C.M. Marijnissen
- R.A. Roos

BAM Infraconsult bv Business Development, H.J. Nederhorststraat 1, 2801 SC
Gouda, Nederland
- P.A.C. van Kester
- R. Gratama
- M.I.V. Jagroep
- P.A. Laane
- R.W. van Niekerk
- F.J. Reinders
- W.D.A. van 't Zelfde

Disclaimer: bij het samenstellen van de inhoud van dit rapport is gebruik gemaakt van slechts een deel van de metingen zoals die zijn uitgevoerd in de Thomassentunnel. De nadere analyse van de gehele set aan metingen kan op termijn mogelijk leiden tot nadere verfijning en uitbreidingen aan de in dit rapport gepresenteerde beschouwingen en resultaten.

Samenvatting

In samenwerking met het Innovatie Programma Luchtkwaliteit is een praktijkproef uitgevoerd in de Thomassentunnel te Rotterdam om te testen of de innovatie, ontwikkeld door TU Delft en BAM, Fine Dust Reduction System (FDRS) een significante reductie van de fijn stof concentratie kan bewerkstelligen.

Het fijn stof reductie systeem (FDRS) 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. Door het elektrische veld rond de draad vindt corona ontlading plaats. Hierdoor ontstaan positieve ionen, die de fijn stof deeltjes één of meerdere positieve ladingen kunnen geven, wat het mogelijk maakt het fijn stof te manipuleren en te sturen in het elektrische veld. Door turbulentie en elektrische mobiliteit slaan de deeltjes neer op gearde oppervlakken, de zogenaamde passieve rekken.

Om vast te kunnen stellen of en in welke mate het FDRS type 1 zoals geïnstalleerd in de Thomassentunnel functioneert, is gebruik gemaakt van verschillende meetapparatuur. Leidend voor de proef in de Thomassentunnel zijn de meetresultaten gemeten met TEOM's. De resultaten van de TEOM's zijn gebruikt om de hoogte van de reductie te bepalen die gerealiseerd is tijdens de proef.

Uit de analyse van de meetgegevens door TNO is aangetoond dat, in de toegepaste configuratie en bij de op dat moment heersende omstandigheden, het FDRS een significante reductie van 11% tot 15% heeft behaald.

Naast het vaststellen van de hoogte van de behaalde reductie is inzicht verkregen in de diverse factoren, die invloed hebben op werking van het FDRS. Het doel van dit document is het presenteren van factoren die de reductie kunnen beïnvloeden en het presenteren van verbeteringen aan het FDRS waarmee de reductie kan worden vergroot. Zo blijkt dat bij een relatieve luchtvochtigheid hoger dan 60% de fijn stof reductie beduidend hoger uitvalt. Daarnaast bepaalt de luchtsnelheid de verblijftijd van de deeltjes in de tunnel en daarmee de tijd die beschikbaar is om fijn stof op te laden en af te vangen. Ook een optimalisatie en een betere positionering van zowel de actieve als de passieve rekken zoals toegepast in de Thomassentunnel kunnen de fijn stof reductie mogelijk verbeteren.

Om een beeld te krijgen van de werking van een volgend type FDRS hebben TU Delft en BAM een eerste aanzet gemaakt voor een fijn stof reductiemodel. Dit model geeft op basis van het aantal actieve rekken een doorkijk naar de potentiële reductie van het FDRS.

TU Delft en BAM zien de resultaten van de proef in de Thomassentunnel als een bevestiging dat het FDRS werkt. Met een significante reductie van 11% tot 15% en de potentie deze op te schalen naar een aanzienlijk hogere reductie is een belangrijke stap gezet om te komen tot een verbetering van de luchtkwaliteit.

Summary

BAM and Delft University of Technology have executed a test in the Thomassentunnel, Rotterdam, in cooperation with the Air Quality Innovation Programme. This platform investigates possibilities to improve air quality for the Dutch government. The objective of this test was to find out if the Fine Dust Reduction System (FDRS) developed by BAM and Delft University of Technology would be capable of reducing the fine dust concentration at the Thomassentunnel. If so, the next research question was if a substantial fine dust reduction rate could be realized.

To reduce the fine dust concentration, the FDRS applies electric wires mounted in so-called active frames that are installed along one side of the tunnel. A positive voltage is applied on these electric wires, creating such an electrostatic field that a corona discharge develops, producing positive ions. Subsequently, the fine dust particles are charged positively, making it possible to manipulate the movements of the particles. Their electrical mobility and the turbulence in the tunnel cause the particles to move towards the so-called passive frames that are connected to the earth. The particles will settle on these frames. As a result, the fine dust concentration in the air is reduced.

Several types of equipment have been installed in the Thomassentunnel to measure the fine dust reduction and a number of other surrounding conditions. The fine dust reduction measured the TEOM's is leading for determining the overall reduction rate during experiment.

The data from the TEOM equipment were analyzed by TNO, an independent research organization that specializes in air quality. TNO states that the FDRS achieved a significant fine dust reduction in the Thomassentunnel of 11% to 15%.

Not only has the fine dust reduction been investigated, but also the parameters that affect the efficiency of the FDRS. The objective of this report is to present the influence of these parameters and to present improvements that can increase fine dust reduction rate by the FDRS. For instance, the results from the TEOM equipment show that the relative humidity influences the fine dust reduction rate: a higher humidity (above 60%) results in a much higher reduction. Besides that, the velocity of the air in the tunnel determines the length of time that the particle will stay in the tunnel and therefore the time available for charging and catching the fine dust particles. Furthermore, an optimization in the design, configuration and number of both the active and passive frames can improve the fine dust reduction as achieved during the test in the Thomassentunnel in Rotterdam.

To get a well balanced idea about the working principles of the FDRS, BAM and Delft University of Technology have started the development of a fine dust reduction model. This model gives a view of the potential fine dust reduction of the FDRS.

Based on the results as presented by TNO, BAM and Delft University of Technology conclude that the working principle of the FDRS has been confirmed and that the FDRS is indeed capable of achieving a substantial reduction of the fine dust concentration. Therefore they believe it is a major step in improving air quality.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
Summary	3
1. Inleiding	5
1.1. Aanleiding	5
1.2. Doel	6
1.3. Opbouw	6
2. Beschrijving FDRS	7
2.1. Werkingsprincipe FDRS	7
2.2. Ontwerpbasis FDRS type 1 in Thomassentunnel	7
3. Meetresultaten Thomassentunnel	9
3.1. Meetapparatuur	9
3.2. Meetresultaten	9
3.3. Depositie	10
4. Kwalitatieve beschouwing op invloedsfactoren	12
4.1. Tunnelafhankelijke invloedsfactoren	12
4.2. Omgevingsafhankelijke invloedsfactoren	15
4.3. Systeemafhankelijke invloedsfactoren	16
5. Beschouwing op potentiële reductie	17
5.1. Scope van het model	17
5.2. Theoretische benadering	18
5.3. Theoretisch model voor tunnelsituaties	18
5.4. Potentiële reductie bij toekomstig FDRS	20
5.5. Veiligheid / gezondheid	22
6. Conclusies	23
6.1. Invloed van tunnelafhankelijke factoren	23
6.2. Invloed van omgevingsafhankelijke factoren	24
6.3. Invloed van systeemafhankelijke factoren	24
6.4. Depositie	25
6.5. Veiligheid / gezondheid	25
6.6. Toepasbaarheid	25
7. Verantwoording	26
Literatuur	27
Bijlage I: Relatieve Vochtigheid per seizoen	28

1. Inleiding

1.1. Aanleiding

Gemotoriseerd verkeer is een belangrijke veroorzaker van emissies in de vorm van onder meer fijn stof. De uitvoering van verschillende grote infrastructurele projecten staat hierdoor onder druk. Bij nieuwe projecten moet het ontwerp voldoen aan de door de wet gestelde eisen ten aanzien van fijn stof (tabel 1). Deze eisen zullen in de toekomst strenger worden.

Europese normen voor fijn stof (PM ₁₀)	
Jaargemiddelde	40 µg/m ³
Daggemiddelde (24 uur)	50 µg/m ³
Maximaal aantal overschrijdingen per jaar	35

Tabel 1 Norm fijn stof

Bron: Wet Milieubeheer

Naar aanleiding van deze fijn stof problematiek rondom snelwegen is door de TU Delft een concept ontwikkeld en gepatenteerd dat aerosolen, zoals fijn stof deeltjes, elektrostatisch kan afvangen. De TU Delft heeft de samenwerking met Koninklijke BAM Groep gezocht om dit concept technisch verder te ontwikkelen tot een marktklaar systeem dat in de praktijk kan worden toegepast om de fijn stof concentratie te verminderen en zodoende de luchtkwaliteit te verbeteren. In het kader van deze ontwikkeling hebben TU Delft en BAM geïnvesteerd in het opzetten en uitvoeren van een reeks praktijkproeven. Hierbij is in een testopstelling een stuk weg nagebouwd, waarbij verschillende parameters zijn onderzocht die van invloed zijn op de prestaties van het systeem, dat de naam FDRS (fine dust reduction system) heeft gekregen. Ook is een proeftunnel gebouwd om de effecten van het systeem in een tunnel te kunnen nabootsen en analyseren. Deze proeven hebben duidelijk gemaakt dat het systeem een substantiële hoeveelheid fijn stof deeltjes uit de lucht kan verwijderen.

Om de ontwikkeling van het systeem verder te brengen, en de prestaties van het systeem te onderzoeken is een meer realistische omgeving gewenst. Daarom hebben TU Delft en BAM in samenwerking met het Innovatie Programma Luchtkwaliteit een praktijkproef uitgevoerd in de Thomassentunnel, onderdeel van de A15, in Zuid-Holland. In de Thomassentunnel is daartoe een configuratie FDRS type 1 aangebracht. Het doel van deze proef in de Thomassentunnel is te onderzoeken of het (FDRS) van BAM en TU Delft, in een praktijksituatie de fijn stof concentratie kan reduceren. Indien deze onderzoeksvraag positief beantwoord wordt, is de aansluitende vraag in welke mate goed het FDRS in staat is om de fijn stof concentratie te verminderen.

In september 2009 is de meetfase van de proef in de Thomassentunnel afgerond. Aansluitend aan deze meetfase heeft TNO haar bevindingen gerapporteerd [TNO, oktober 2009] en daarin een uitspraak gedaan over de mate waarin FDRS type 1, zoals geïnstalleerd in de Thomassentunnel, in staat is om de concentratie van fijn stof (µg·m⁻³ of %) te. De resultaten geven een reductie PM10 van 11% tot 15% op basis van de toegepaste TEOM- en Airpointer

meetapparatuur. Dit resultaat is reden om de potentie van het systeem voor de fijn stof reductie in tunnels nader te beschouwen.

Bij eerdere experimenten en herhalingsexperimenten in de proefopstelling te Zwammerdam zijn reducties behaald van 10% tot 60% [BAM / TU Delft, 2008], op basis van CPC metingen. Om tot een onderbouwde verklaring te komen waarom de werking van FDRS in dergelijke mate varieert, is een beter begrip van de omstandigheden waarin het FDRS functioneert van belang.

1.2. Doel

Zoals hierboven gesteld is het hoofddoel van de praktijkproef in de Thomassentunnel te onderzoeken of het FDRS een (significante) reductie van de fijn stof concentratie kan bewerkstelligen. Als nevendoelelstelling hebben BAM en TU Delft het vergaren van meer informatie over het gedrag en de resultaten van het systeem. Hiermee kunnen nieuwe inzichten opgedaan worden, die optimalisatie van het concept mogelijk maken, en daarmee een eventueel volgend type van het FDRS.

Gegeven de significante reductie van de fijn stof concentratie door de FDRS is het van belang voor IPL en BAM/TU Delft om inzicht te krijgen in de potentiële reductie van fijn stof die het systeem kan bereiken bij een andere configuratie. Daarom hebben BAM en TU Delft een eerste opzet gemaakt van een reductiemodel dat een verwachting kan geven van de fijn stof reductie bij de toepassing van een geoptimaliseerde en eventueel uitgebreide versie van het FDRS.

Het doel van dit document is het presenteren van factoren die de reductie kunnen beïnvloeden en het presenteren van verbeteringen aan het FDRS waarmee de reductie kan worden vergroot. Daarnaast is het doel van dit document inzichtelijk te maken in welke mate een geoptimaliseerd FDRS fijn stof kan afvangen.

1.3. Opbouw

In hoofdstuk 2 wordt kort de werking van het FDRS uiteen gezet, waarbij wordt ingegaan op de configuratie die is toegepast tijdens de proeven in de Thomassentunnel. Hoofdstuk 3 bevat een samenvatting van de gebruikte meetapparatuur, de behaalde meetresultaten en een paragraaf over depositie. Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 wordt een kwalitatieve beschouwing gegeven van de factoren die invloed hebben op de werking van het FDRS en welk effect deze invloedsfactoren hebben op het systeem. In hoofdstuk 5 volgt een beschouwing op de potentiële reductie van toekomstige versies van het FDRS. In dit hoofdstuk wordt tevens vooruitgekeken naar de mogelijkheden voor optimalisatie van het FDRS voor de toekomst. Hoofdstuk 6 bevat de conclusies.

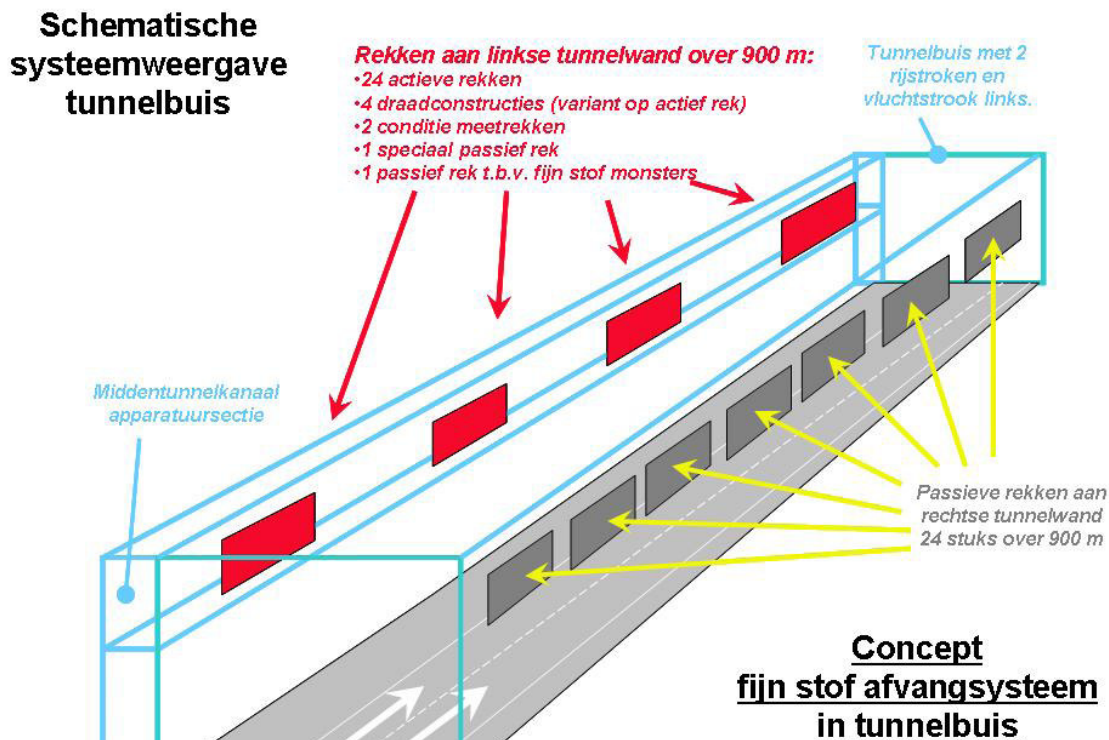
2. Beschrijving FDRS

2.1. *Werkingsprincipe FDRS*

Het fijn stof reductie systeem (FDRS) 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. Deze lading maakt het mogelijk het fijn stof te manipuleren en te sturen in het elektrische veld. Turbulentie en elektrische mobiliteit zorgen ervoor dat de deeltjes neerslaan op gearde gaasschermen, die speciaal zijn gemonteerd om het fijn stof af te vangen. Deze gearde schermen worden de passieve rekken genoemd. Als gevolg van de van der Waals krachten die optreden blijft het fijn stof aan deze rekken plakken, waardoor het geen schade aan de gezondheid meer kan toebrengen.

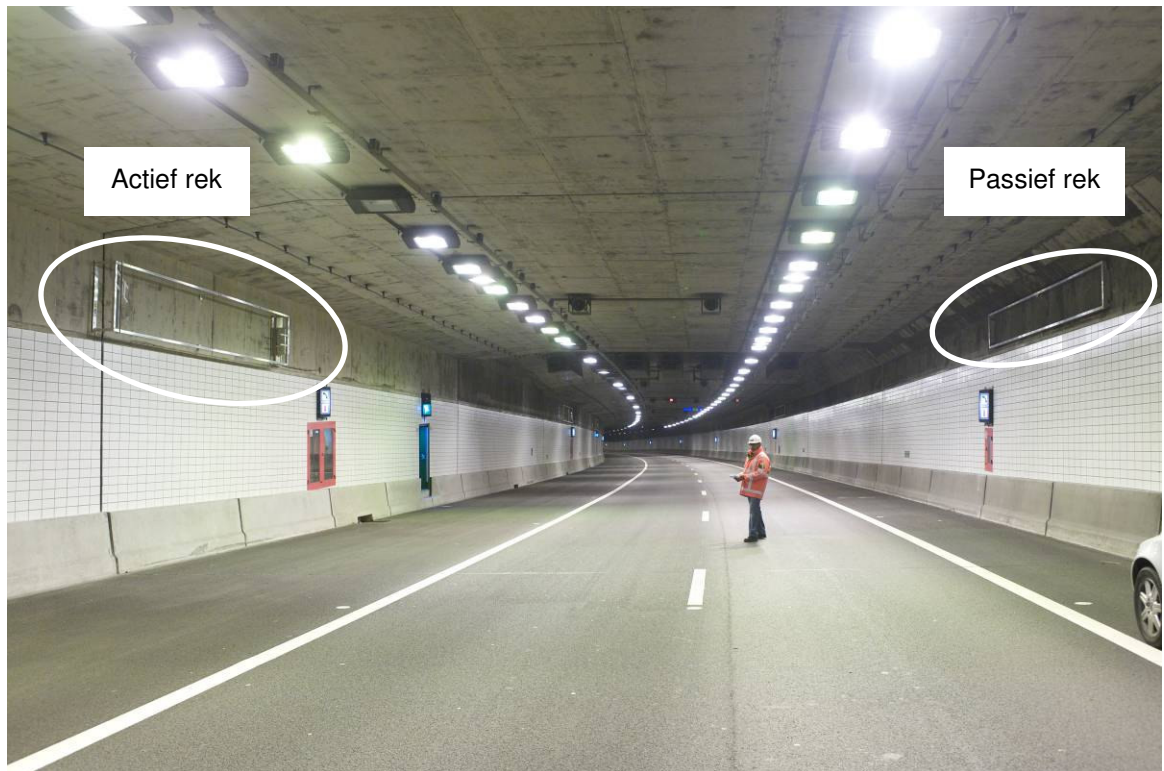
2.2. *Ontwerpbasis FDRS type 1 in Thomassentunnel*

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 figuur 1 is deze configuratie schematisch weergegeven.



Figuur 1: Schematische weergave van de FDRS configuratie in de Thomassentunnel

In figuur 2 wordt een foto getoond van de Thomassentunnel met daarin een actief rek gemonteerd aan de linker zijde van de tunnel en een passief rek gemonteerd aan de rechter zijde van de tunnel.



Figuur 2: Foto van de Thomassentunnel met daarin links het actieve rek en rechts het passieve rek gemonteerd

De fijn stof deeltjes worden in het elektrische veld van de actieve rekken opgeladen. De in de tunnel aanwezige turbulentie (mede veroorzaakt door het verkeer) zorgt voor een menging van het opgeladen fijn stof over de totale doorsnede van de tunnel. Samen met de elektrische mobiliteit zorgt dit mechanisme ervoor dat de deeltjes neerslaan op de passieve rekken.

In totaal zijn er in de Thomassentunnel 24 actieve rekken type 1 met elk 2 keer 6 m¹ draad en 4 actieve rekken type 1a met elk 15 m¹ enkele draad bevestigd. Tegenover de actieve rekken zijn 24 passieve rekken bevestigd.

Het totale vermogen van FDRS 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.

3. Meetresultaten Thomassentunnel

3.1. Meetapparatuur

Om te bepalen of en in welke mate het FDRS de hoeveelheid fijn stof in de lucht vermindert, is tijdens de proef in de Thomassentunnel gebruik gemaakt van verschillende soorten meetapparatuur. Leidend voor de proef in de Thomassentunnel zijn de meetresultaten gemeten met de TEOM's. TEOM's meten de massa aan PM10. De resultaten van de TEOM's zijn gebruikt voor de vaststelling van de hoogte van de reductie die gerealiseerd is door het FDRS type 1 in de configuratie, zoals toegepast in de Thomassentunnel. Om de resultaten van de TEOM's te corrigeren voor het ventilatievoud en de verkeersintensiteit is gebruik gemaakt van Airpointers, die de NO_x concentratie meten. Tevens zijn in de tunnel een LVS (massa meting) en een tweetal meetstations voor de registratie van de weersomstandigheden geplaatst.

Tegelijkertijd hebben TU Delft en BAM tijdens de proef metingen verricht met CPC's en een APS. Een CPC meet de aantallen deeltjes tot 2,5 µm en een APS meet de verdeling van de deeltjes grootte van 0,5 tot 10 µm. Deze metingen hebben gediend als verificatie van inzichten die in eerdere proeven zijn verkregen. Het grote verschil tussen de TEOM's en de CPC's is, dat een TEOM een meetbereik heeft tot 10 micrometer en massa meet, terwijl een CPC een meetbereik heeft tot 2,5 micrometer en aantallen deeltjes meet.

Om aan te sluiten bij de rapportage van TNO en het nog niet beschikbaar zijn van de analyse van de CPC en APS data is gekozen om de beschouwingen in dit rapport te baseren op de meetresultaten van de TEOM's. Over de resultaten van de CPC's en APS worden in deze rapportage geen resultaten gepresenteerd.

3.2. Meetresultaten

De metingen in de Thomassentunnel zijn opgesplitst in 2 fases, te weten:

- Fase 1: 100 minuten cyclus, waarbij het FDRS 100 minuten aan en 100 minuten uitgeschakeld is geweest;
- Fase 2: etmaal cyclus, waarbij het FDRS een etmaal aan en vervolgens een etmaal uitgeschakeld is geweest.

De bevindingen voor de fijn stof reductie tijdens de twee meetperioden zijn in onderstaande tabel weergegeven.

Meetfase	Reductie fijn stof (PM10) op basis van TEOM
Fase 1	11% ¹
Fase 2	15% ¹

Tabel 2: Overzicht van de behaalde reducties van de fijn stof concentratie (PM10)

¹ Resultaten data-analyse TNO [TNO, november 2009]

3.3. Depositie

Tijdens de voorbereidingen van de proef is de vraag naar voren gekomen of de werking van het FDRS kan leiden tot extra fijn stof depositie op de in de tunnel aanwezige apparatuur. Om deze vraag te beantwoorden zijn depositiemetingen verricht. In de onderstaande tabel 3 en figuur 2 worden de resultaten weergegeven. In de notitie over het depositieonderzoek [BAM / TU Delft, 23 oktober 2009] worden de depositiemetingen in meer detail beschreven.

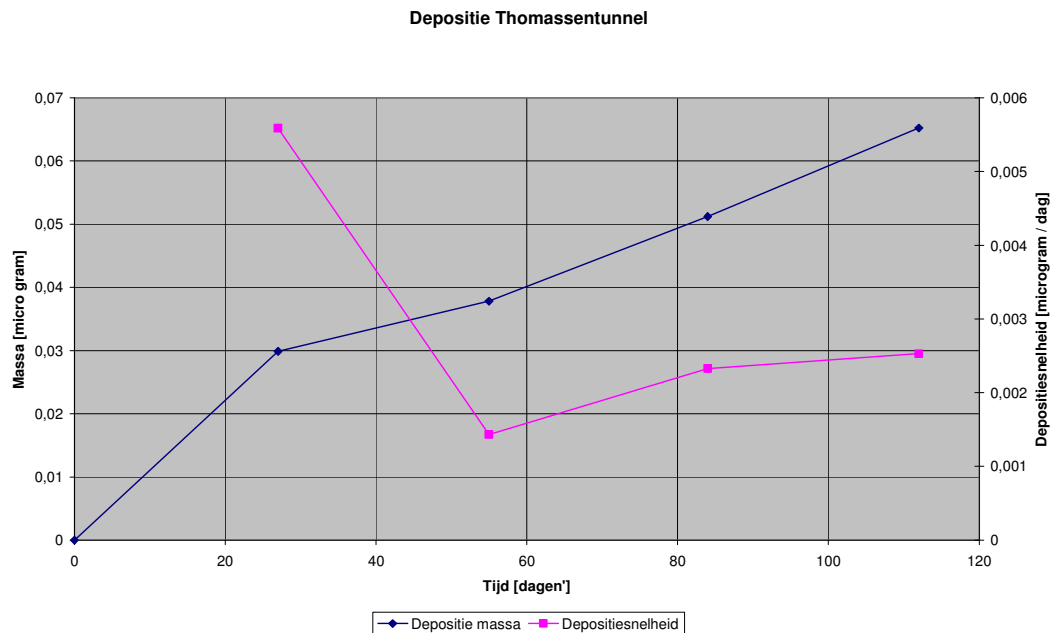
Op 16 april zijn de depositieplaten geïnstalleerd aan het plafond van de Thomassentunnel. Vlak voor de start van de proef op 13 mei is plaat 1 uit de tunnel verwijderd. Daarna is maandelijks een plaat verwijderd. Na analyse en reiniging is plaat 1 op 21 juli teruggeplaatst in de tunnel en op 3 september weer verwijderd. Na 3 september hebben dus geen depositiemetingen meer plaatsgevonden.

Datum	Plaat	Depositie [μg]	Netto depositie [μg]	Netto depositiesnelheid [$\mu\text{g}/\text{dag}$]
16-04-09*	1	0	0	
13-05-09	1	0,02988	0,02988	$1,107 \cdot 10^{-3}$
10-06-09	2	0,03782	0,00794	$0,284 \cdot 10^{-3}$
09-07-09	3	0,05119	0,01337	$0,461 \cdot 10^{-3}$
06-08-09	4	0,06522	0,01323	$0,501 \cdot 10^{-3}$
21-07-09*	1	0	0	
03-09-09	1	0,02255	0,02255	$0,513 \cdot 10^{-3}$

* datum aanbrengen schone depositieplaten

Tabel 3: Depositie op depositieplaten

Uit bovenstaande tabel en onderstaande grafiek blijkt dat de netto depositiesnelheid in de fase voorafgaand aan de start van de proef op 13 mei 2009 een factor 2,5 hoger is dan tijdens de proef (gemeten van 13 mei 2009 tot en met 3 september 2009).



Figuur 3: Resultaten depositie metingen

De depositiemetingen die zijn verricht tussen 16 april 2009 en 03 september 2009 geven een indicatie dat het FDRS niet leidt tot extra toename van de depositie op in de tunnel aanwezige apparatuur. Op basis van deze proef kunnen geen uitspraken worden gedaan over de gevolgen voor onderhouds- en schoonmaakwerkzaamheden.

Er is geconstateerd dat een geconcentreerde depositie achter de actieve rekken heeft plaatsgevonden. De mate van depositie hangt af van de locatie in de tunnel: naar het einde van de tunnel neemt de hoeveelheid depositie achter de actieve rekken toe. Wat het aandeel fijn stof achter de actieve rekken is ten opzichte van de totale hoeveelheid afgevangen fijn stof is onbekend.

In figuur 4 wordt de depositie op de tunnelwand getoond ter plaatse van een actief rek. Het actieve rek is ten tijde van het maken van deze foto reeds verwijderd.



Figuur 4: Extra depositie op de tunnelwand waar een actief rek gemonteerd was

4. Kwalitatieve beschouwing op invloedsfactoren

De proeven uitgevoerd in de proeftunnel in Zwammerdam en in de Thomassentunnel hebben uitgewezen dat de werking van het FDRS bepaald wordt door verschillende factoren. Deze factoren, ook wel invloedsfactoren genoemd kunnen verdeeld worden in 3 categorieën:

- 1) Tunnelafhankelijke invloedsfactoren;
- 2) Omgevingsafhankelijke invloedsfactoren;
- 3) Systeemafhankelijke invloedsfactoren.

In dit hoofdstuk wordt een kwalitatieve beschouwing gegeven van het effect dat de verschillende invloedsfactoren hebben op de werking van het FDRS.

4.1. *Tunnelafhankelijke invloedsfactoren*

4.1.1. Invloed van fijn stof bronnen

De bronnen van fijn stof die de hoogte van de concentratie in de tunnel bepalen, worden gevormd door de achtergrondconcentratie en de bijdrage van het verkeer in de tunnel.

Een deel van het aanwezige fijn stof (de achtergrondconcentratie) in de omgeving van de tunnel, wordt door de wind de tunnel ingevoerd. Deze bron is afhankelijk van de omgeving waarin de tunnel gelegen is. Deze bron is redelijk constant en wordt als een puntbron beschouwd.

Daarnaast is er een variabele bron, die gevormd wordt door het verkeer. Deze bron is afhankelijk van de verkeersintensiteit in de tunnel. Deze bron wordt als lijnbron beschouwd omdat de voertuigen zorgen voor een continue uitstoot tijdens hun verblijf in de tunnel. Door de continue productie van fijn stof kan gesteld worden dat geen enkel fijn stof reducerend systeem ooit een reductie van 100% kan bewerkstelligen.

4.1.2. Invloed van de fijn stof concentratie in de tunnel

Uit een analyse van de meetresultaten van de proef in de Thomassentunnel lijkt het, dat de hoogte van de fijn stof concentratie veroorzaakt door de bovengenoemde punt- en lijnbron invloed heeft op de afvangst. De tendens is dat een hogere fijn stof concentratie leidt tot een lagere (relatieve) reductie, terwijl de absolute reductie wel hoog blijft. Zo bleek uit de resultaten dat de fijn stof reductie 's nachts hoger was dan overdag. Het zou dus kunnen dat er sprake is van een tekort aan capaciteit van het FDRS bij hele hoge fijn stof concentraties (overdag). Voorzichtigheid is geboden bij deze veronderstelling, want het is ook denkbaar dat andere factoren een rol spelen. Zo kan het ook zijn dat de relatieve luchtvochtigheid hierin een rol speelt. Hierover wordt later in dit hoofdstuk meer aandacht besteed.

Nader onderzoek moet uitwijzen wat het precieze effect is van de hoogte van de fijn stof concentratie op de reductie hiervan.

4.1.3. Invloed van de luchtsnelheid in de tunnel

De werking van het FDRS wordt bepaald door de gemiddelde snelheid van de lucht en de mate van turbulentie en luchtverplaatsingen in de tunnel. De hoogte van de luchtsnelheid heeft invloed op de tijd die de fijn stof deeltjes zich in de tunnel bevinden en daardoor op de tijd die het FDRS heeft om de deeltjes op te laden en af te vangen. Het FDRS is gebaseerd op het principe van een geroerd vat dat zorg draagt voor transport van fijn stof deeltjes van het actieve naar het passieve rek. De gemiddelde luchtsnelheid in de tunnel wordt bepaald door twee factoren:

- 1 drukverschillen veroorzaakt door de richting van de (buiten)wind bij de tunnelmonden;
- 2 impuls van het verkeer aan de lucht in de tunnelbuis;

Metingen geven aan dat de voorkeursrichting van de lucht in de tunnel vooral worden bepaald door de invloed van het verkeer. In ogenschouw moet worden genomen dat de gemiddelde snelheid in het midden van de tunnel hoger is dan de windsnelheid zoals die wordt gemeten nabij de tunnelwanden. De mate van geroerdheid is wordt mede bepaald door het Reynold getal van de stroming:

$$R_e = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

Hierin is:

- V de karakteristieke snelheid [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$];
- D de karakteristieke diameter [m];
- ν de kinematische viscositeit van het stromende medium [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

Voor een windsnelheid van bijvoorbeeld 2 m/s is het Reynolds getal reeds hoger dan 1.000.000. Dit geeft aan dat ook bij lage luchtsnelheden sprake is van turbulentie.

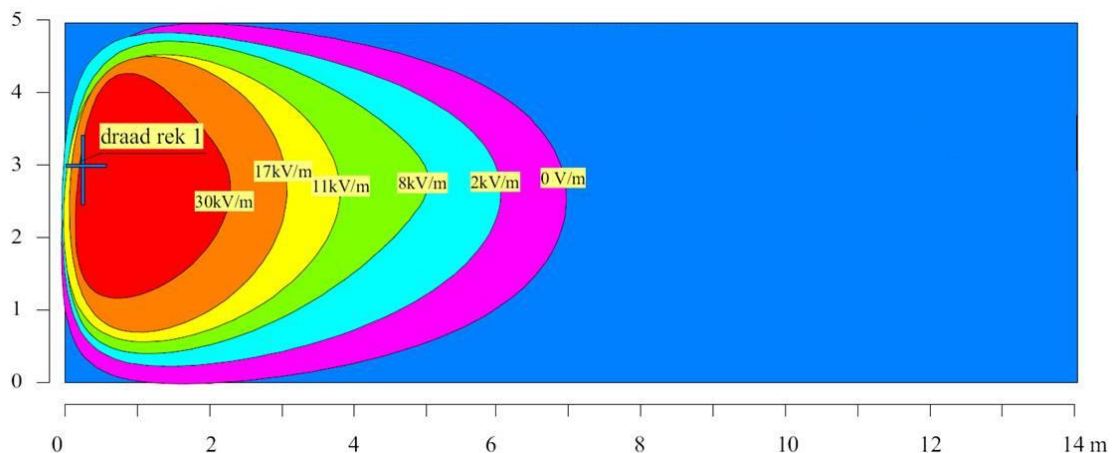
De mate van geroerdheid wordt daarnaast ook bepaald door de (zijdellingse) luchtverplaatsingen ten gevolge van het verkeer. De verkeersintensiteit zal deze roering beïnvloeden. Bij de Thomassentunnel is verder een rijbaan niet in gebruik. Dit zal een dempende invloed hebben op de luchtverplaatsing ten gevolge van het verkeer. Het is verder bekend uit rookproeven door H3M Huijben Consultancy dat in een verder lege tunnel stratificatie kan optreden waarbij menging over grotere afstanden kan optreden. Het is niet bekend of stratificatie optreedt bij verkeer. Het moge duidelijk zijn dat deze invloeden op de roering moeilijk zijn te kwantificeren en mogelijk is er sprake van enige stratificatie en is de roering niet overal volledig homogeen. Echter, als de tunnel als geheel bekeken wordt met aanwezigheid van verkeer, dan is de aanname van een homogeen geroerd vat de beste.

4.1.4. Invloed van het type verkeer in de tunnel

Analyse van de verkregen data tijdens de proef in de Thomassentunnel geeft geen indicatie dat de samenstelling van het type verkeer (het aandeel vrachtwagens) van invloed is op de hoogte van de reductie van fijn stof.

4.1.5. Invloed van de configuratie van de tunnel

Met de configuratie van de tunnel wordt bedoeld de verhouding tussen lengte, breedte en hoogte van de tunnel. Deze maten zijn belangrijk bij de positiebepaling van de actieve rekken. In de proeftunnel in Zwammerdam volstond de configuratie waarbij de actieve rekken aan de ene zijde van de tunnel hingen en de passieve rekken aan de andere zijde. Uit de proeven in de Thomassentunnel, in een situatie zonder verkeer, is gebleken dat de veldsterkte, die veroorzaakt wordt door het actieve rek, in het midden van de tunnel tot een zeer lage waarde is afgenomen (zie figuur 5). Het elektrische veld is effectief over circa 1/3 van de tunneldoorsnede.



Figuur 5: Gemeten veldsterkte Thomassentunnel

Als gevolg hiervan konden de deeltjes het passieve rek weliswaar bereiken door de turbulentie in de tunnel, maar niet rechtstreeks door de elektrische mobiliteit in het elektrische veld. Er zal dus wel degelijk in de gehele tunnel depositie plaatsvinden, zoals toegelicht in paragraaf 4.1.3.

Op basis van deze inzichten zal de depositie van de geladen deeltjes echter eerder op gearde objecten, dichtbij de actieve rekken plaatsvinden. De verderaf geplaatste passieve rekken zijn niet optimaal effectief. Er kan dus mogelijk een effectievere afvangst van de deeltjes op de passieve rekken gerealiseerd worden. Dit kan door de passieve rekken dichtbij de actieve rekken te positioneren, bijvoorbeeld aan het plafond boven elk actief rek of zelfs achter een actief rek tegen de tunnelwand.

Naast de herpositionering van de passief rekken, zal ook de herpositionering van de actieve rekken een positieve bijdrage aan de afvangst kunnen leveren. In de Thomassentunnel zijn de actieve rekken aan de linker zijwand van de tunnel bevestigd. Door deze naar de rechter zijde van de tunnel te verplaatsen, bevinden de rekken zich dichtbij de fijn stof bron en zullen meer deeltjes onder invloed van de rekken komen. De figuur maakt ook duidelijk dat bij een gelijke configuratie en een minder brede tunnel de effectiviteit van het elektrische veld met bijbehorende depositie mechanismen aanzienlijk zal toenemen.

4.2. Omgevingsafhankelijke invloedsfactoren

4.2.1. Invloed van de relatieve vochtigheid in de tunnel

Zoals eerder in dit hoofdstuk aangegeven, speelt de relatieve luchtvochtigheid een belangrijke rol in de effectiviteit van het FDRS. Op basis van de metingen in de Thomassentunnel kan gesteld worden dat het systeem een hogere fijn stof reductie behaalt naargelang de luchtvochtigheid hoger wordt. Dit wordt verklaard doordat een hogere vochtigheid voor een betere geleiding zorgt van zowel de lading in de lucht als op de wand. Dit effect neemt sterk toe vanaf een relatieve luchtvochtigheid van 60%. In tabel 4 zijn de bevindingen van de relatie tussen de reductie en de relatieve luchtvochtigheid opgenomen.

Relatieve luchtvochtigheid (%)	Reductie fijn stof (PM10) o.b.v. TEOM, meetfase 1	Reductie fijn stof (PM 10) o.b.v. TEOM, meetfase 2
Gem. Fase 1 (62%) ²	11% ¹	
Gem. Fase 2 (58%) ²		15% ¹
< 40	Onvoldoende data	Onvoldoende data
40 – 50	5% ¹	9% ¹
50 – 60	7% ¹	8% ¹
60 – 70	12% ¹	28% ¹
70 – 80	19% ¹	24% ¹
> 80	Onvoldoende data	Onvoldoende data

Tabel 4: Relatie tussen de relatieve vochtigheid in de Thomassentunnel en de reductie van de fijn stof concentratie (PM10)

Uit metingen naar luchtvochtigheid zowel binnen als buiten de tunnel blijkt dat de relatieve luchtvochtigheid binnen de tunnel een veel constanter patroon geeft, dus een minder grootte spreiding of variatie van de waarden. Daarnaast valt op dat de relatieve luchtvochtigheid binnen de tunnel systematisch circa 10% lager ligt dan buiten de tunnel.

In bijlage 1 is een overzicht opgenomen met daarin de gemiddelde relatieve luchtvochtigheid in Nederland per seizoen. Hier is uit op te maken dat de proefperiode in de Thomassentunnel valt in het seizoen met de laagste luchtvochtigheid.

4.2.2. Invloed van de temperatuur in de tunnel

Een mogelijke invloedsfactor voor mate van de fijn stof reductie is de temperatuur. Gesteld wordt dat deze gekoppeld is aan de relatieve luchtvochtigheid, maar gezien de beperkte tijd is hier nog geen nader onderzoek naar verricht om dit te kunnen aantonen.

¹ Resultaten data-analyse TNO [TNO, november 2009]

² Relatieve luchtvochtigheid gemeten door BAM en TU Delft

4.3. *Systeemafhankelijke invloedsfactoren*

4.3.1. Invloed van het aantal en type actieve rekken

Het actieve rek type 1 zoals toegepast tijdens de proef in de Thomassentunnel is ontwikkeld op basis van testen in de proeftunnel in Zwammerdam en de beschikbare ruimte in de Thomassentunnel in verband met het profiel van vrije ruimte. Door de proef in de Thomassentunnel zijn nieuwe inzichten verkregen in de werking en eigenschappen van het actieve rek. Een belangrijke bevinding uit proeven in Zwammerdam is dat er een positief verband bestaat tussen de lengte van de draad en de mate van fijn stof reductie.

4.3.2. Invloed van de configuratie van actieve en passieve rekken

Het actieve rek van het FDRS kan dus mogelijk geoptimaliseerd worden, teneinde een betere individuele prestatie per rek te realiseren. Uiteindelijk zal de combinatie van het type actief rek en het aantal actieve rekken bepalen wat de maximale hoeveelheid elementaire lading is die beschikbaar komt voor oplading van de fijn stof deeltjes. Gecombineerd met de configuratie van passieve en actieve rekken zorgt dit voor een optimaal effect (aan de configuratie is tevens aandacht besteed in paragraaf 4.1.5). Na optimalisatie van de systeemafhankelijke parameters zal de hoogte van de reductie afhankelijk zijn van omgevingsafhankelijke invloeden.

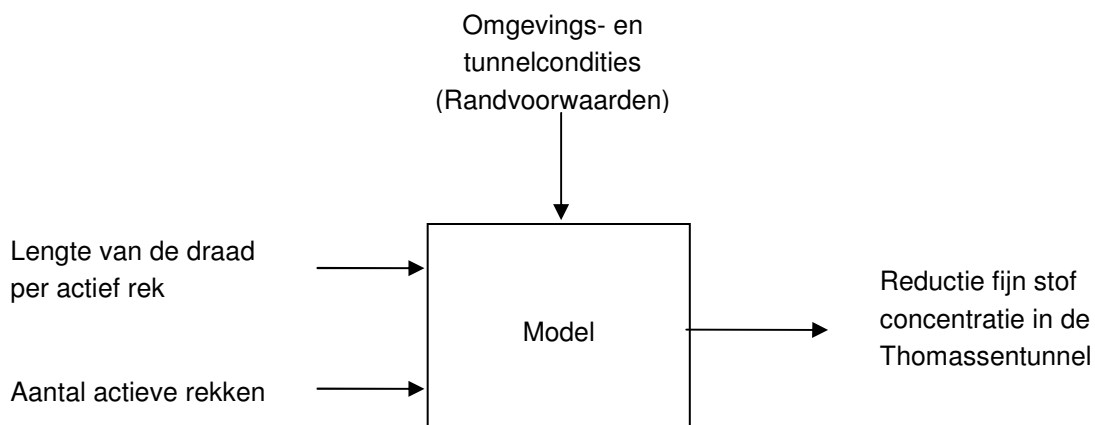
5. Beschouwing op potentiële reductie

Een van de doelstellingen van de testen in zowel de proeftunnel in Zwammerdam als de Thomassentunnel is te komen tot een inzicht in de factoren die de reductie kunnen beïnvloeden en verbeteringen aan het FDRS waarmee de reductie kan worden vergroot. Met de ervaringen die tijdens de proef in de Thomassentunnel zijn opgedaan, kan een eerste invulling worden gegeven aan een fijn stof reductiemodel.

5.1. *Scope van het model*

In het voorgaande hoofdstuk zijn de factoren beschreven die invloed hebben op de werking van het FDRS. De tunnelafhankelijke en de omgevingsafhankelijke factoren zijn weliswaar zeer belangrijk (met name de relatieve luchtvochtigheid), maar deze zijn niet of nauwelijks te beïnvloeden tijdens de ontwikkeling van het FDRS. Bovendien zijn deze factoren op dit moment nog niet volledig te onderbouwen of te verklaren. In dit stadium zijn deze factoren daarom minder relevant voor het reductiemodel.

De systeemafhankelijke invloedsfactoren daarentegen zijn opgesteld door BAM en TU Delft en kunnen voor een volgende versie van het FDRS relatief eenvoudig aangepast worden. Het gaat hier dus om de lengte van de draad per actief rek en het aantal toe te passen rekken, zie paragraaf 4.4. Voor deze eerste opzet van het reductiemodel zijn daarom alleen de systeemafhankelijke invloedsfactoren meegenomen. Het model geeft dus een verwachting voor de reductie bij wijziging van systeemafhankelijke factoren, maar bij onveranderde omgevings- en tunnelafhankelijke factoren. In figuur 6 is dit schematisch weergegeven.



Figuur 6: Schematische weergave van de input en output van het model

Het model dat in dit hoofdstuk gepresenteerd wordt, vormt dus een eerste stap in de modelvorming. Het is niet uitgesloten dat het model later uitgebreid zal worden met andere factoren.

5.2. Theoretische benadering

Om te komen tot een reductiemodel voor de bepaling van fijn stof reductie door het FDRS, is het noodzakelijk een theoretische uiteenzetting te doen van de gebruikte wetenschappelijke kennis. Hiervoor is onder andere gebruik gemaakt van 'Aerosol Technology' [Hinds, 1999].

De werkwijze om te komen tot een geschikt model is gebaseerd op het principe van de elektrostatische precipitator. Een elektrostatische precipitator maakt gebruik van de elektrische mobiliteit van geladen deeltjes in een elektrisch veld en de depositie in een turbulente situatie. Elektrische mobiliteit is de snelheid van een geladen deeltje in een elektrisch veld per eenheid van veldsterkte.

$$\frac{N(t)}{N_0} = \exp\left(\frac{-2v_{TE} \cdot t}{H}\right) \quad (1)$$

$$v_{TE} = Z \cdot E = \frac{ne \cdot C_c}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d} \cdot E \quad (2)$$

Hierin is:

N(t)	is de concentratie na een tijd t bij een actief systeem
N ₀	is de concentratie bij een in-actief systeem
v _{TE}	is de elektrostatische eindsnelheid; dit is de snelheid, die een geladen deeltje in een elektrisch veld krijgt wanneer de elektrische kracht en de luchtweerstandskracht op het deeltje even groot, maar tegengesteld gericht zijn
t	is de tijd (s) ten opzichte van t=0
H	is de karakteristieke afstand in de tunnel gerelateerd aan afstand af te leggen door een geladen deeltje [m]
Z	is de elektrische mobiliteit [m ² V ⁻¹ s ⁻¹]
E	is de sterkte van het elektrische veld [Vm ⁻¹]
ne	is de ladingseenheid, deze is 1,602·10 ⁻¹⁹ C
C _c	is de slipcorrectiefactor
η	is de viscositeit [1,81·10 ⁻⁵ Nsm ⁻²]
d	is de diameter van het deeltje

5.3. Theoretisch model voor tunnelsituaties

In een tunnel is er sprake van een turbulente situatie en de tunnel kan opgevat worden als een geroerd vat (een onderbouwing voor deze veronderstelling is terug te vinden in paragraaf 4.1.3). Steeds andere pakketjes lucht komen bij de wanden en uit deze pakketjes sedimenteren deeltjes en worden deeltjes door diffusie afgevangen op de wanden. Als er geladen deeltjes zijn en een elektrisch veld van bijvoorbeeld het plafond naar de vloer zullen ook deeltjes door elektrische krachten worden neergeslagen. Daar sedimentatie en diffusie altijd plaatsvinden zullen die voor de bepaling van een berekeningsmodel voor een tunnelsituatie niet nader bekeken worden, maar alleen de extra neerslag als gevolg van het door de FDRS gecreëerde elektrische krachten.

Met als uitgangspunt de theoretische benadering om te komen tot een berekeningsmodel voor de bepaling van de mate van reductie die gerealiseerd kan worden bij toepassing van het FDRS, wordt gekomen tot onderstaand model.

Als we voor t substitueren in formule 1: $t = \frac{l_{draad}}{v_{wind}} = \frac{l}{v_w}$ krijgen we

$$\frac{N_l}{N_0} = \exp\left(-v_{TE} \cdot \frac{2l}{v_w \cdot H}\right) \quad (3)$$

Voor een constante configuratie is $2v_{TE} / H = \text{Constante (C)} \rightarrow \frac{N_l}{N_0} = \exp\left(-\frac{C \cdot l}{v_w}\right)$

Dus de reductie wordt: $R = 1 - \exp\left(-\frac{C \cdot l}{v_w}\right)$

Voor een draadlengte, x keer zo lang als de oorspronkelijke lengte l geldt:

$$l_x = l \cdot x = \frac{N_{lx}}{N_0} = \left\{ \exp\left(-\frac{C \cdot l}{v_w}\right) \right\}^x \quad (4)$$

Hierin is:

- N(t) is de concentratie na een tijd t bij een actief systeem
- N₀ is de concentratie bij een in-actief systeem
- v_{TE} is de karakteristieke neerslagsnelheid die een geladen deeltje ondergaat als gevolg van een elektrisch veld E [ms⁻¹]
- t is de tijd (s) ten opzichte van t=0
- H is de karakteristieke afstand in de tunnel gerelateerd aan de afstand af te leggen door een geladen deeltje [m]
- N_l is de eindconcentratie bij een bepaalde lengte draad
- l is de lengte van de draad van 1 actief rek type 1 [m]
- v_w is de windsnelheid in de tunnel [ms⁻¹]
- C is een constante, afhankelijk van de tunnel en het type FDRS
- R is de reductie
- x is het aantal maal de actieve rekken type 1
- N_{lx} is de concentratie bij een x aantal actieve rekken type 1

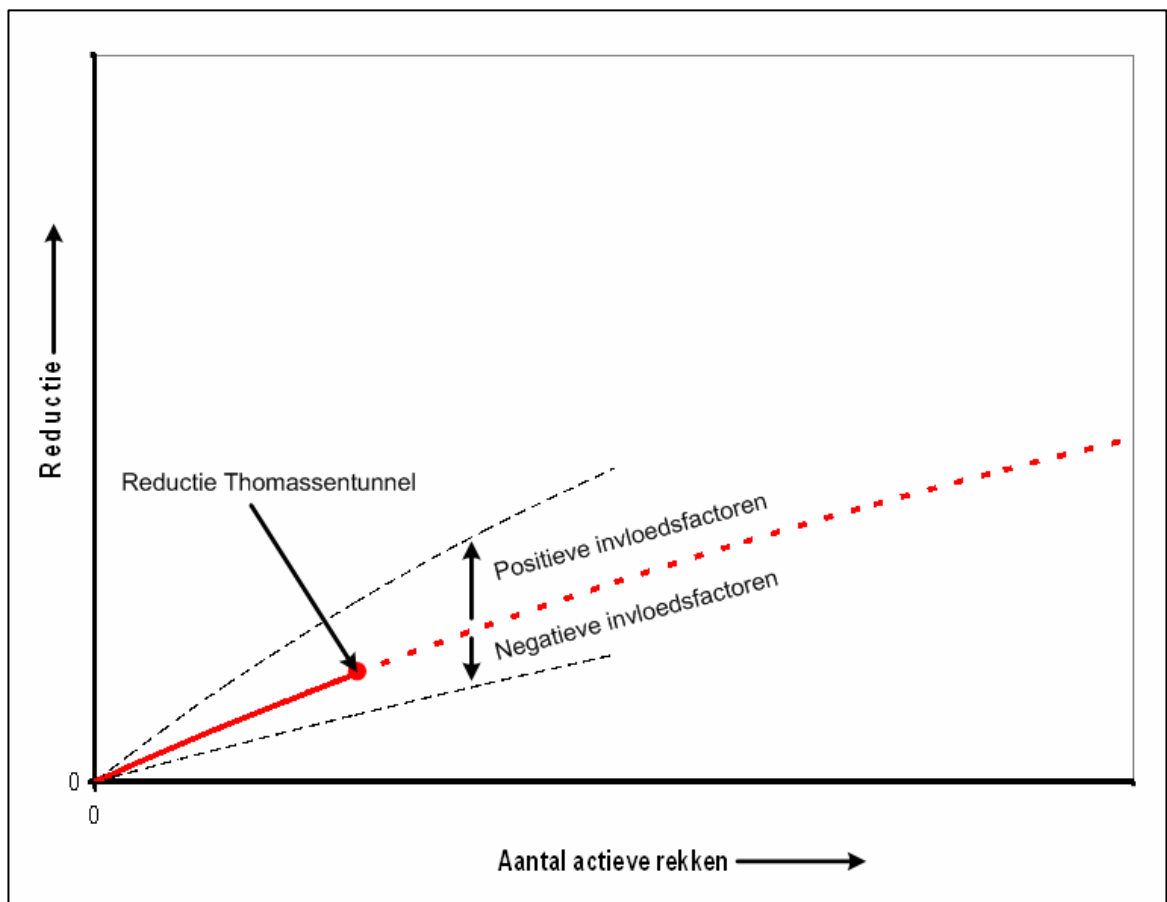
De constante C is een factor die afhangt van de betreffende tunneldimensies en de daar heersende omstandigheden, zoals uiteengezet in hoofdstuk 4.

5.4. Potentiële reductie bij toekomstig FDRS

Voor de proeven in de Thomassentunnel is bij aanvang gekozen voor een bepaalde configuratie van het FDRS, type 1 (24 actieve rekken). Deze configuratie heeft geleid tot een reductie van 11% voor fase 1 en 15% voor fase 2, zie hiervoor de rapportage van TNO [TNO, november 2009] opgesteld in verband met de proef.

Het reductiemodel zoals gepresenteerd in voorgaande paragrafen is nog niet dusdanig doorontwikkeld dat hier een kwantitatieve analyse mee uitgevoerd kan worden. Het is dus riskant om op basis van de in de Thomassentunnel behaalde resultaten een uitspraak in harde cijfers te doen voor de toekomst. Evident is echter wel, dat er diverse factoren zijn (zoals die in het voorgaande hoofdstuk uiteengezet zijn), die in meer of mindere mate invloed hebben op de werking van het FDRS.

In figuur 7 is de potentiële reductie van het FDRS grafisch weergegeven. Het gaat hier nadrukkelijk om een indicatieve weergave. Indien de invloedsfactoren gunstig zijn, neemt de potentiële fijn stof reductie toe. Ook als het aantal actieve rekken toeneemt (de x-as), neemt de fijn stof reductie toe. Een belangrijk onderdeel hierin zijn de systeemafhankelijke factoren, omdat deze door de ontwikkelaar van het FDRS aangepast kunnen worden.



Figuur 7: Indicatieve weergave van de relatie tussen het aantal actieve rekken en de reductie van fijn stof

In tabel 5 wordt de veronderstelde relatie weergegeven tussen de belangrijkste invloedsfactoren en de behaalde fijn stof reductie door het FDRS.

Invloedsfactor		Verandering	Reductie fijn stof
Tunnelafhankelijk	Fijn stof concentratie	↑	↓
	Luchtsnelheid	↑	↓
Omgevingsafhankelijk	Relatieve vochtigheid	↑	↑
	Temperatuur	↑	?
Systeemafhankelijk	Aantal rekken	↑	↑
	Type rekken	↑	↑

Tabel 5: Relatie tussen verandering van de belangrijkste invloedsfactoren en de impact op de fijn stof reductie

In hoofdstuk 3 zijn naast de in tabel 5 vermelde factoren de volgende tunnelafhankelijk factoren beschreven:

- 1) Fijn stof bronnen
- 2) Type verkeer
- 3) Configuratie tunnel

Deze factoren zijn niet meegenomen in de tabel, omdat over deze factoren geen zinvolle uitspraak gedaan kan worden of en in welke mate een verandering een impact heeft op de fijn stof reductie.

Bij de verandering van het type rekken wordt bedoeld dat een verbetering van het ontwerp van de rekken kan leiden tot een hogere reductie.

5.5. Veiligheid / gezondheid

Uit het gezondheidsartikel 'Gezondheid- en veiligheidsaspecten inzake atmosferische ruimtelading' [BAM / TU Delft, 10 september 2009] blijkt dat de huidige configuratie past binnen de gezondheidsgrenzen. Dit wordt bevestigd door de beschouwing hierop door TNO [TNO, september 2009]. Daarnaast geeft TNO een doorkijk naar de gezondheidsaspecten bij een eventuele uitbreiding van het FDRS.

De omvang van de uitbreiding zal worden afgestemd op de situatie in de tunnel waarbij de gezondheidsgrenzen steeds betrokken wordt. Daarnaast bestaat de mogelijkheid om bij een toekomstig FDRS de fijn stof concentratie of de verkeersintensiteit te monitoren. De capaciteit van de actieve rekken kan dus elk moment afgestemd worden op de actuele fijn stof concentratie, door een of meerdere actieve rekken in- of uit te schakelen.

6. Conclusies

Voor de bepaling van de invloedsfactoren en de vorming van het reductiemodel is gebruik gemaakt van de TEOM metingen die gedaan zijn tijdens de praktijkproef in de Thomassentunnel. De meetdata gegenereerd door de CPC en APS zijn hierin nog niet meegenomen en zullen mogelijk, na analyse hiervan, leiden tot vernieuwde inzichten.

Het reductiemodel is een eerste opzet om een doorkijk te kunnen geven over de potentie van het FDRS bij uitbreiding van het systeem. Toekomstige onderzoeken en analyses zullen bijdragen aan een verdere verfijning van dit model en daarmee over het effect van de invloedsfactoren op de mate van reductie die het FDRS kan bewerkstelligen in een bepaalde situatie en configuratie.

In de eerste paragrafen van dit hoofdstuk volgt een resumé van de belangrijkste invloedsfactoren op de werking van het FDRS en vervolgens wordt ingegaan op de haalbare reductie van een toekomstige versie van het FDRS. Aansluitend volgen de conclusies met betrekking tot depositie, gezondheid en toepasbaarheid van het systeem.

6.1. *Invloed van tunnelafhankelijke factoren*

6.1.1. **Fijn stof concentratie in de tunnel**

Het is mogelijk dat de capaciteit van het FDRS in de Thomassentunnel bij zeer hoge fijn stof concentraties aan de lage kant was, met als gevolg dat de reductie niet optimaal was.

6.1.2. **Luchtsnelheid in de tunnel**

In een tunnel is te allen tijde sprake van een turbulente stroming met grote luchtverplaatsingen door het verkeer. Dit betekent dat geladen deeltjes over de hele tunneldoorsnede zijn te vinden.

De hoogte van de gemiddelde luchtsnelheid is wel een belangrijk aspect in verband met de verblijftijd van het fijn stof in de tunnel en daarmee de kans om het fijn stof op te laden en af te vangen. Bij een (te) hoge luchtsnelheid kan de reductie omlaag gaan, omdat de kans op oplading en depositie verkleind wordt.

6.1.3. **Configuratie van de tunnel**

Tijdens de proeven in de Thomassentunnel is ondervonden dat de elektrische veldsterkte in het midden van de tunnel tot bijna nul is afgenomen. Dit heeft een nadelig effect op de depositie van de geladen deeltjes. Om te komen tot een betere configuratie van het FDRS in de tunnel moet de positie van de passieve rekken herzien worden. Door de passieve rekken dichterbij de actieve rekken te plaatsen, kan de fijn stof reductie verbeterd worden.

Tevens zal de positionering van de actieve rekken dichterbij de fijn stof bron een bijdrage kunnen leveren aan een verbeterde afvangst van het fijn stof. Dit is te verklaren door het feit dat op de

rechter rijstrook de grootste productie van fijn stof plaatsvindt. Door de actieve rekken naar deze zijde van de tunnel te verplaatsen zal een groter aantal fijn stof deeltjes de actieve rekken passeren, en wordt de kans op oplading vergroot.

De Thomassentunnel is een vrij brede tunnel. Bij een minder brede tunnel zou de configuratie zoals toegepast tijdens de proef in de Thomassentunnel beter functioneren, doordat het elektrische veld een groter deel van de tunneldoorsnede beslaat. Dit zal leiden tot een beter rendement van het FDRS type 1.

6.2. Invloed van omgevingsafhankelijke factoren

6.2.1. Relatieve vochtigheid

Uit onderzoek naar de verschillende invloedsfactoren die mogelijk een effect hebben op de hoogte van de reductie blijkt dat een hoge relatieve luchtvochtigheid een positief effect heeft op de hoogte van de reductie. Dit effect wordt goed zichtbaar bij een relatieve luchtvochtigheid van 60% en hoger.

De proef in de Thomassentunnel heeft plaats gevonden in de periode van het jaar met de laagste relatieve luchtvochtigheid (zie bijlage 1).

6.3. Invloed van systeemafhankelijke factoren

6.3.1. Actieve rekken

De praktijkproef in de Thomassentunnel heeft geleid tot vernieuwde inzichten over de uitvoering van het FDRS, wat kan leiden tot een geoptimaliseerde uitvoering van het systeem, type 2. Aanpassing van het aantal, het ontwerp en de positie van de actieve rekken kan in de toekomst leiden tot een grotere efficiëntie en een hogere reductie van de fijn stof concentratie.

6.3.2. Modelvorming voor het FDRS

Naar aanleiding van de proef in de Thomassentunnel hebben BAM en TU Delft eerste aanzet tot een reductiemodel gegeven. Met dit model kan een verwachting gegeven worden van de fijn stof reductie bij de toepassing van een geoptimaliseerde en eventueel uitgebreide versie van het FDRS. De input van dit model beperkt zich vooralsnog tot het type actieve rekken en het aantal actieve rekken, de relatieve luchtvochtigheid bijvoorbeeld kan dus nog niet als input parameter ingesteld worden. Het model geeft de verwachting dat uitbreiding van het FDRS zal leiden tot een substantieel verbeterde afvangst van fijn stof. Ook de positionering van de elementen van het FDRS kan worden geoptimaliseerd.

6.4. Depositie

De resultaten van het depositieonderzoek dat tijdens de proef in de Thomassentunnel is gehouden indiceren dat het FDRS type 1 geen extra depositie veroorzaakt op de in de tunnel aanwezige apparatuur. Achter de actieve rekken heeft wel extra depositie plaatsgevonden.

Bij mogelijke toekomstige versies van het FDRS wordt gedacht aan een andere configuratie van de actieve en/of passieve rekken. Bij deze nieuwe configuratie wordt de afvangst van fijn stof op de passieve rekken verbeterd, waardoor de kans op extra depositie op de in de tunnel aanwezige apparatuur zal afnemen ten opzichte van de situatie bij het FDRS type 1.

6.5. Veiligheid / gezondheid

Het FDRS type 1 zoals geïnstalleerd in de Thomassentunnel blijft binnen de grenzen van gezondheid met betrekking het laden van deeltjes. Toekomstige versies van het FDRS zullen altijd afgestemd worden op de situatie in de desbetreffende tunnel, waarbij de gezondheidsaspecten steeds betrokken worden. De mogelijkheid bestaat om bij een toekomstig FDRS de fijn stof concentratie of de verkeersintensiteit te monitoren. De capaciteit van de actieve rekken kan dus elk moment afgestemd worden op de actuele fijn stof concentratie, door een of meerdere actieve rekken uit te schakelen.

6.6. Toepasbaarheid

Op basis van de resultaten van de proef in de Thomassentunnel hebben TU Delft en BAM een beter beeld gekregen van de werking van het FDRS. Met de proef is aangetoond dat dit systeem toepasbaar is tunnels. De resultaten zijn voor BAM en TU Delft aanleiding om toepassingsmogelijkheden van het FDRS in andere situaties, zoals overkappingen, straat canyons en verdiepte wegen nader te onderzoeken.

7. Verantwoording

Naam en adres van betrokken partijen

Technische Universiteit Delft
Faculteit Technische Natuurwetenschappen
Afdeling Biotechnologie, Sectie Botanische Tuin
Juliana laan 67
2628 BC Delft
Nederland

BAM Infraconsult bv
Afdeling Business Development
H.J. Nederhorststraat 1
2801 SC Gouda
Nederland

Namen van projectmedewerkers

W.N.J. Ursem (TU Delft)
J.C.M. Marijnissen (TU Delft)
R.A. Roos (TU Delft)
M.I.V. Jagroep (BAM, Tebodin)
R. Gratama (BAM, Tebodin)
W.D.A. van 't Zelfde (BAM, Infraconsult)
P.A. Laane (BAM, Infraconsult)
P.A.C. van Kester (BAM, Infraconsult)
R.W. van Niekerk (BAM, Van den Berg Infrastructuren)
F.J. Reinders (BAM, Van den Berg Infrastructuren)

Ondertekening en autorisatie vrijgave



Drs. Ing. W.N.J. Ursem
Directeur Botanische tuin TU Delft

Literatuur

VROM, wet milieubeheer, bijlage 2, 13 juni 1979

Hinds W.C., Aerosol Technology, 2^e druk februari 1999, Wiley and Sons Inc.

BAM / TU Delft, 'Technische haalbaarheidsstudie elektrostatisch concept', 9 juli 2008

BAM / TU Delft, Systeembeschrijving Fijn stof reductie systeem in Thomassentunnel, Versie 04, d.d. 22 januari 2009

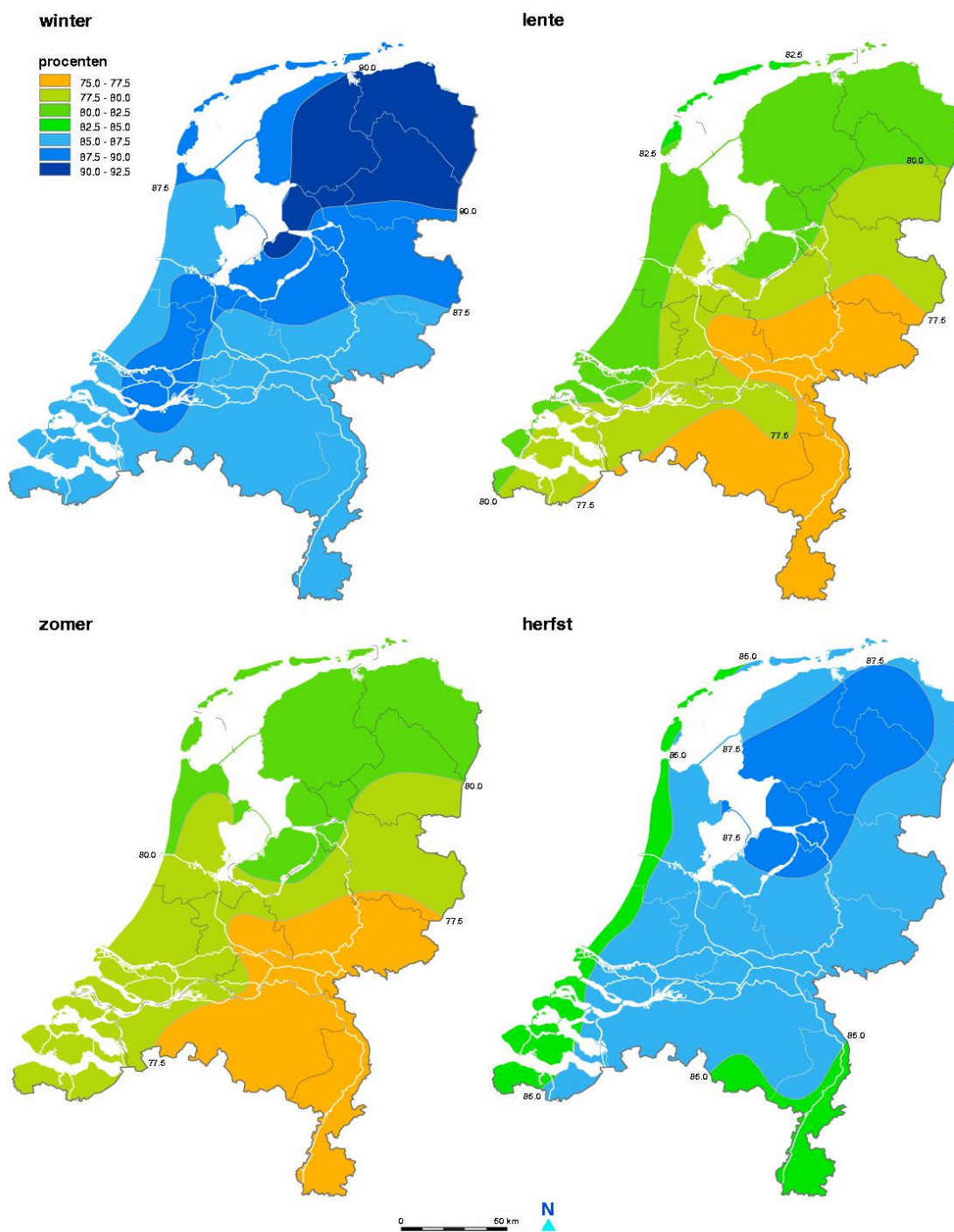
BAM / TU Delft, Gezondheid- en veiligheidsaspecten inzake atmosferische ruimtelading, revisie 2, 10 september 2009

TNO, 34-UT-2009-01863_RPT_ML, Beoordeling TUD/BAM rapport: Gezondheid- en veiligheidsaspecten inzake atmosferische ruimtelading, september 2009

BAM / TU Delft, I00147-mem-u-0005, Depositie meting Thomassentunnel, 23 oktober 2009

TNO, IPL Praktijkonderzoek "Elektrostatisch concept in Thomassentunnel", 3 november 2009

Bijlage I: Relatieve Vochtigheid per seizoen



Bron: KNMI