

Gezondheid en veiligheids aspecten inzake atmosferische ruimtelading.

Jan MARIJNISSEN *, Rein André ROOS *, Ad van 't ZELFDE^o, Paul Laane^o, Bob URSEM *

* Technische Universiteit Delft, Faculteit Technische Natuurwetenschappen, Afdeling Biotechnologie, Sectie Botanische Tuin, Julianalaan 67, 2628BC Delft, Nederland.

^o BAM Infraconsult bv Business Development, H.J.Nederhorststraat 1, 2801 SC Gouda, Nederland.

Inleiding

In deze beschouwing worden gezondheid en veiligheids aspecten inzake atmosferische ruimtelading beschouwd in de natuur en in de technische innovatie voor reductie van fijnstof van de TU Delft, bekend onder de naam TUD/BAM CleanAIR systeem.

De opbouw van deze beschouwing is als volgt. Als eerste zal worden ingegaan op de theoretische achtergrond van geladen fijnstof. Vervolgens is aan de hand van 3 scenario's berekend wat de maximale hoeveelheid lading op fijnstof zou kunnen zijn als gevolg van het CleanAIR systeem, waarna een vergelijking wordt gemaakt met de situatie bij hoogspanningslijnen en wordt ingegaan op de elektrische veiligheid van het CleanAIR systeem. Tot slot staan in de slotbeschouwing de conclusies met betrekking tot de veiligheids aspecten in relatie tot het CleanAIR systeem.

Beschouwing van geladen fijnstof

In de natuur is lading aanwezig in de vorm van positieve-, negatieve- en neutraal geladen deeltjes in de lucht. De genoemde ladingen zijn in de natuur aanwezig volgens de Boltzmann verdeling (zie tabel 15.4, pagina 12 (Hinds,1999)). Al in 1900 zijn door J. Elster en H. Geitel in het hooggebergte een verhouding ontdekt tussen negatief en positief geladen deeltjes van één op vier. Lange tijd is echter aangenomen dat de verhoudingen omgekeerd waren, waarschijnlijk omdat de tekst van het wetenschappelijke artikel door A.P. Kreuger niet juist vertaald was. Uit de metingen van Elster en Geitel kan worden opgemaakt dat de veel gebruikte ladingsverdelingcurve, de zogenaamde Boltzmann verdeling, ongeveer 1,5 elementaire ladingen naar de positieve kant verschoven is in het hooggebergte. In onze streken, laagland Nederland, geldt immers altijd de Boltzmann verdeling.

De technische innovatie voor reductie van fijnstof van de TU Delft is gebaseerd op de natuurlijke lading van fijnstofdeeltjes, welke bestaat uit een oplading via statische elektriciteit. Hiervoor wordt een lading gebruikt, gelijk aan waarden die in de natuur kunnen voorkomen met daarbij een geringe stroomsterkte (orde grootte microAmpere).

Voor de gezondheid en de veiligheid is de aard en de mate van depositie van fijnstof voor de mens en dier in het gebied van het nasopharynx deel tot in de longblaasjes van de longen van eminent belang.

Er zijn uit de literatuur maar weinig in vivo metingen van ruimtelading op mensen bekend. Het zijn veelal de resultaten verkregen in het Laboratorio Fisica Sanitaria, te Bologna, Italië die aangehaald worden, Melandri (1977), (1983). Uit deze proeven blijkt dat voor de gemeten deeltjes grootte 0,3, 0,6 en 1,0 μm duidelijk een elektrostatisch verhoogde depositie plaatsvindt als de deeltjes meer dan 30 elementaire ladingen dragen, Prodi (1985). Dit komt ook tot uiting in figuur 1 (Melandri (1977)).

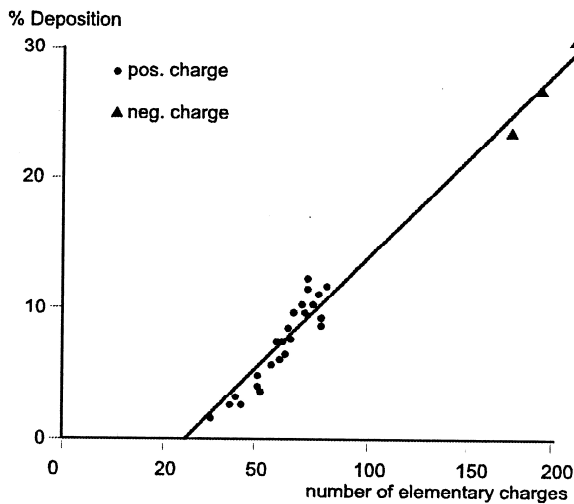


Fig. 1. Percent electrostatic deposition at a particle size of 0,6 μm .

Figuur 1 (Melandri, 1977)

Wat ook op valt is de beduidend hogere depositie van negatief geladen deeltjes waarop Melandri nauwelijks commentaar geeft. In het TUD/BAM CleanAIR systeem wordt uitsluitend positieve lading gebruikt!

Cohen et al (1996) heeft onderzoek gedaan naar elektrische krachten en deeltjes in een metalen long model. Wij citeren: “Het merendeel van de deeltjes in de lucht worden in het onderzoek gedomineerd door nanometer grote deeltjes met een geringe lading.” In haar depositie studie toonde zij aan, dat behulp van haar holle metalen luchtweg modellen, de elektrische krachten zorg dragen voor een opmerkelijk verbeterde depositie van deeltjes in humane longen. “De depositie van hoog geladen deeltjes door elektrische krachten zijn al in voorgaande korte duur experimenten in de luchtwegen van mens en dier aangetoond.” Theoretisch kan men ook verwachten dat er inderdaad een verhoogde depositie van geladen deeltjes zal bestaan versus neutraler deeltjes volgens Beverly S. Cohen. “Echter modellen en experimenten met deeltjes waarvan de depositie gedomineerd wordt door zwaartekracht en geïnitieerde krachten suggereren dat effecten uitsluitend merkbaar zullen zijn voor hoog geladen deeltjes.” Cohen’s resultaten tonen aan dat de effecten van een enkele lading op een ultrafijn deeltje onmogelijk genegeerd kunnen worden in haar long depositie model. Cohen concludeert dat elektrische lading op een aerosol deeltje in vele gevallen een fundamenteel belangrijke parameter is in de depositie van deeltjes. Het is afhankelijk van de grootte en de hoeveelheid ladingen per deeltje. “Het afzetten, impacteren en diffusie van aerosol deeltjes zijn afhankelijk van het aerodynamische gedrag, waarbij interceptie meer afhankelijk is van de geometrie van het deeltje en verwaarloosbaar is voor bolvormigheid en andere relatieve compactheid van deeltjes. In de bovenste luchtwegen, tracheobronchiën, is de luchtsnelheid hoog en is er simpelweg geen genoeg tijd om deeltjes door zwaartekracht af te zetten. Het belangrijkste afzetting mechanisme is daar diffusie voor de kleinste deeltjes ($d < 100 \text{ nm}$) en impactering voor grote deeltjes ($d > 500 \text{ nm}$). Sedimentatie is verwaarloosbaar vanwege de hoge luchtsnelheden in de bronchiën, terwijl het wel het belangrijkste proces is voor depositie in aveoli. Door diffusie in de aveoli bestaat er bovendien een groot verschil tussen de enkelvoudig geladen-, door lading geneutraliseerde- en neutrale ultrafijne deeltjes.” Cohen heeft uitsluitend gemeten met positief geladen deeltjes en aanzienlijke hogere ladingen dan Melandri in haar experimenten, maar maakt in haar conclusie geen verschil tussen de beide polariteiten. Dat verschil is er echter wel, vooral in een zeer vochtige omgeving zoals die van de long. Het was Thompson (1898) die het idee opperde, dat condensatie van waterdamp een functie zou kunnen zijn van de polariteit van een condensatie kern. Wilson (1898) toonde aan, dat dit inderdaad het geval was en dat condensatie veel sneller plaats vond op negatief geladen kernen.

Ferron en Busch (1996) stelden vast dat hygroscopische aerosolen een verschillend gedrag in de longen vertonen dan niet hygroscopische deeltjes (figuur 6 en 7).

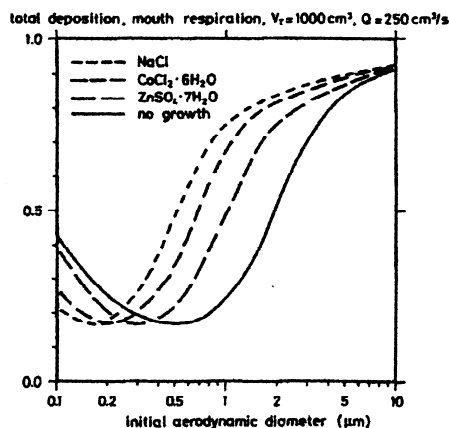


Figure 6. Total deposition for initially dry salt and non-hygroscopic (unit density) particles in the lungs for a tidal volume of 1000 cm³ and inhalation and exhalation airflows of 250 cm³s⁻¹ (Ferron *et al.*, 1988b).

Figuur 6 (Ferron et al, 1988)

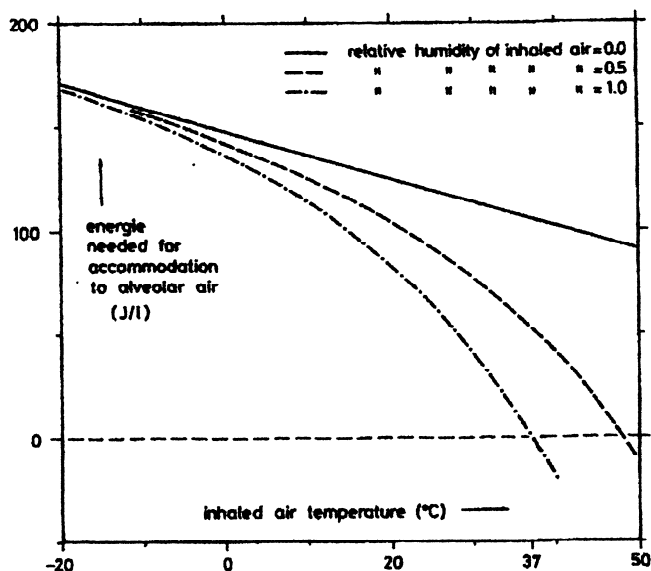


Figure 7. Energy needed to accommodate the inhaled air to a temperature of 37°C and a RH of 0.995 as a function of inhaled temperature and three RH's (Ferron *et al.*, 1988a).

Figuur 7 (Ferron et al, 1988)

Hicks en Megaw (1985) simuleerde het transport van aerosolen in de tracheobronchiën door aerosolen te voeren door een natte- en een droge wand. Mc Murray en Stozenburg (1989) gebruikten een Tandem Differential Mobility Analyser om hygroscopische eigenschappen van geselecteerde deeltjes grootte in situ te meten. Deze methode gaf gedetailleerde informatie over deeltjes kleiner dan 0,5 micrometer. Een vergelijkbare methode is gebruikt door Busch et al in 1994, waarbij een hygroscopische- en een niet hygroscopische fractie gevonden is. De ratio tussen deze genoemde fracties bleek afhankelijk en gecorreleerd aan de geïnitieerde grootte van de deeltjes. Ferron et al (1984) stelden al dat de relatieve luchtvochtigheid gedurende het inhaleren bij temperaturen van 23, 10 en 0 °C. tendert naar een constante waarde van RH = 0,995 (figuur 7, 8a en b).

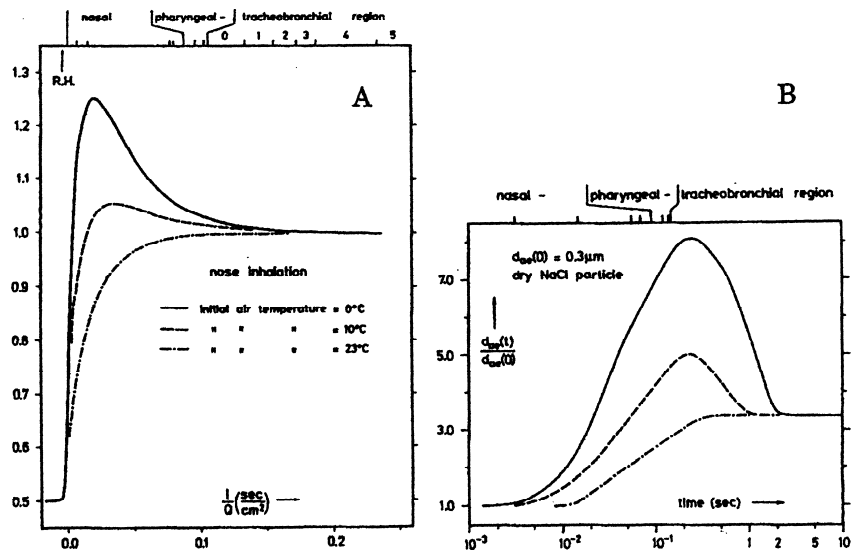


Figure 8a. Estimated RH of the air during inhalation of air with temperatures of 23, 10 and 0°C and RH of 0.5 (Ferron *et al.*, 1984).

Figure 8b. Size of a dry NaCl particle with an initial aerodynamic diameter of 0.3 µm during the inhalation of air with temperatures of 23, 10 and 0°C (Ferron *et al.*, 1984).

Figuur 8 a en b (Ferron et al, 1984)

Uit de onderzoeken van Melandri, Prodi, Cohen en Ferron kunnen we concluderen dat de depositie van fijnstof afhankelijk is van de grootte, het lading teken en de luchtvochtigheid. Daarbij vindt in het nasopharynx gebied tot de longen de depositie van de deeltjes met een grootte tot 0,01 µm plaats door diffusie, de depositie van deeltjes van 3 µm en groter plaats door impactie en zijn deeltjes van 0,1 µm en vergelijkbare grootte in depositie ladingsafhankelijk (Cohen). Het RIVM rapport 61079001 (Klefkens en Pruppers, 2007) stellen bovendien dat de depositie door corona-ontladingen op deeltjes groter dan 0,3 µm en kleiner dan 0,1 µm niet worden beïnvloed. Wij citeren uit het RIVM rapport 61079001: “ Een betrouwbare kwantitatieve schatting voor de verhoging van de depositie is op dit moment niet mogelijk. De depositie in de longen van grotere deeltjes (diameter boven 0,3 µm) of kleinere deeltjes (diameter onder 0,1 µm) wordt vrijwel zeker niet door corona-ontladingen beïnvloed.” De bovengrens van maximaal laden van deeltjes is voor fijnstof deeltjes van 0,3 µm volgens Melandri 15 ladingen. Het RIVM rapport 610790001 (Klefkens en Pruppers, 2007) stellen dat er een bovengrens van 10 ladingen is voor deeltjes van 0,3 µm grootte. Om goed inzicht te krijgen van de situatie bij het TUD/BAM CleanAIR systeem berekenen we de lading op deeltjes in de meest ongunstige situatie, namelijk dat er een constante hoeveelheid deeltjes zich bevinden in een ruimte met 0% afvangst van fijnstof. Het opladen van deeltjes gebeurt door een bron met statische elektriciteit en gebeurt random. Het afvangen van deeltjes door het TUD/BAM CleanAIR systeem zal daarom voornamelijk door positief geladen deeltjes gebeuren. Dus het gunstige effect wordt in de onderstaande berekening niet meegenomen. Hierbij kijken we voorts naar de situatie met de grootste trefkans dat deeltjes opgeladen kunnen worden. We gaan uit dat er zeer veel deeltjes in de lucht door verkeer aanwezig zijn, namelijk de maximale waarde in urbane gebieden ofwel 100 keer het aantal deeltjes in een normale urbane situatie.

Verder weten we, op basis van schaalproeven uit Zwammerdam dat wij inderdaad kunnen uitgaan van deze extra hoge aerosolwaarden. De gemeten waarden voor de aantallen aerosolen in de schaalproeven bleek de maximale meetgrens van een CPC te zijn, ofwel 10^{13} deeltjes per kubieke meter. Hierbij namen de door de APS gemeten waarden niet significant toe. Verder maken we voor het elektrische veld en de geschatte diffusie lading gebruik van figuur 15.3 op pagina 8 (Hinds, 1999).

In de berekening stellen we dat al de aanwezige deeltjes opgeladen kunnen worden. De stroom van de oplaadrekken is gelimiteerd op 380 microAmpere. De lading hierdoor veroorzaakt, wordt maar gedeeltelijk overgedragen aan de fijnstof deeltjes. Bij het opladen is er sprake van een evenwicht, zodat er in de

Gezondheidsdocument, Revisie 2, 10 september 2009

praktijksituatie een lagere lading optreedt. De lagere ladingswaarden worden veroorzaakt door lek naar de wand en geleiding door luchtvochtigheid.

Bij de schaalproeven in de proeftunnel in Zwammerdam is een lading verhouding van draad tegen de wand en wand in het midden van de proeftunnel gemeten. De lading verhouding was een factor 10 bij hoge concentratie fijnstofdeeltjes. M.a.w. 1 op de 10 elementair ladingen is beschikbaar voor deeltjes in de ruimte rond de draad, waarvan nog een onbekend aantal alsnog de wand zal raken.

Berekening van een tunnelsituatie en de ladingen op deeltjes.

Voor een correcte berekening moet er een massabalans (deeltjes in en deeltjes uit) en een ladingsberekening gemaakt worden. Hiervoor zijn echter de input gegevens niet bekend. In plaats van gekoppelde differentiaalvergelijkingen zal een benadering worden toegepast om de orde van grootte te berekenen en om daarbij de maximale waarden zo correct mogelijk in te schatten.

Hierbij nemen we aan dat er een constante concentratie aan deeltjes in de tunnel aanwezig zijn, immers er worden altijd nieuwe deeltjes gevormd door het verkeer en de verdwijning van deeltjes geschied door ventilatie, welke voor de Thomassentunnel 7 m/s is.

Aangenomen wordt dat de tunnel een lengte heeft van 1108 meter, een breedte van 14,45 meter en een hoogte van 4,5 tot 5,37 meter, ofwel de exacte maatvoering van de Thomassentunnel in het Europoortgebied van de rijksweg A15.

Voor deze situaties zijn scenario's doorgerekend waarbij gevarieerd is in:

- Wel of geen invloed vocht op de deeltjes grootte
- De verwachte hoeveelheid lading die beschikbaar is voor het opladen van deeltjes

De stroomsterkte per rek is 42 microAmpere en is maximaal begrensd. De lekkage aan de wand is 50%, die door het metalen constructieframe direct via geleiding aan de wand verloren zal gaan.

De stroomsterkte in de coronadraden zonder lekkage aan de omgeving is $I/\text{lengte} = 21 \mu\text{A}/12 \text{ meter} = 1,75 \times 10^{-6} \text{ A/m}$. Er blijft maximaal $1,75 \times 10^{-6} \text{ A/m}$ stroomsterkte beschikbaar voor de oplading van deeltjes.

In de tunnel bevinden zich in totaal 24 rekken van 12 meter (2 x 6 meter effectieve lengte per rek).

De veldsterkte E rond de draad in de tunnel:

Op 0,5 meter afstand $E = 117 \text{ kV/m}$

Op 1 meter afstand $E = 72,5 \text{ kV/m}$

De luchtsnelheid in de tunnel is $V_{\text{lucht}} = 7 \text{ m/s}$

We nemen tevens aan dat de triple mode vorm van distributie aanwezig is volgens Whitby (1978).

In figuur 2 van Whitby (1978) zien we de verschillende verdelingen van deeltjesdepositie voor ultrafijnstof, fijnstof en grovere achtergronddeeltjes. De fijnstof depositie van $0,1 \mu\text{m}$ tot $1 \mu\text{m}$ grootte zijn afkomstig van verbranding motoren. Verder is hier ook sprake van omvorming van deeltjes naar grotere clusters, ofwel secundaire aerosolen.

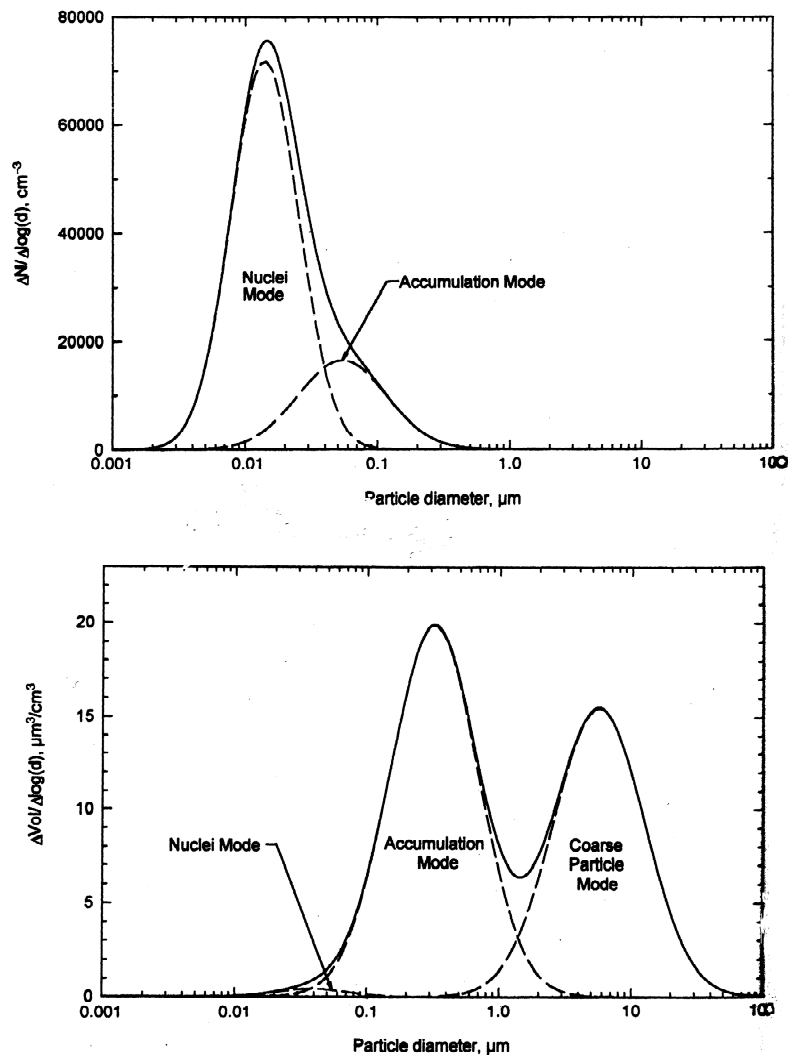
Aangenomen wordt een condensatie modus diameter voor de allerkleinste deeltjes met een waarde van $\text{CMD} = 0,014 \mu\text{m}$ conform de deeltjes verdeling "nuclei mode" in bovenstaande figuur 2 (Hinds, 1999) en tabel 14.3 (Whitby, 1978).

Ten tweede bestaan de opeengestapelde modus of verdeling van deeltjes uit verbrandingdeeltjes, smog deeltjes en nog kleinere deeltjes die in de tijd geocoaguleerd zijn met de al aanwezige opgestapelde deeltjes. Deze laatste zijn dus ingevangen door het principe van hechting aan grotere deeltjes gedurende de tijd.

Aangenomen wordt een condensatie modus diameter voor de geaccumuleerde deeltjes met een waarde van $\text{CMD} = 0,054 \mu\text{m}$ conform de deeltjes verdeling "accumulation mode" in onderstaande figuur 2 (Hinds, 1999) en tabel 14.3 (Whitby, 1978).

Ten derde de achtergronddeeltjes, welke bestaan uit door de wind opgeblazen deeltjes, grote zout deeltjes van de golven in de Noordzee en mechanisch gegenereerde grotere antropogene deeltjes.

Aangenomen wordt een condensatie modus diameter voor achtergrond deeltjes met een waarde van CMD = 0,86 μm conform de deeltjes verdeling “coarse particle mode” in figuur 2, pagina 6 (Hinds, 1999) en tabel 14.3 (Whitby, 1978).



Figuur 2 (Hinds, 1999)

TABLE 14.3 Modal parameters for average urban aerosol.^a

Mode	CMD (μm)	GSD	C_N (cm^{-3})	C_{vol} ($\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$)
Nuclei	0.014	1.80	106,000	0.63
Accumulation	0.054	2.16	32,000	38.4
Coarse Particle	0.86	2.21	5.4	30.8

^aData from Whitby (1978).

De gemiddelde grootte parameter voor een doorsnee urbane aerosol is $1,06 \times 10^{11}$ deeltjes per kubieke meter. Dit geeft een aantal van 106.000 ultra grootte deeltjes per kubieke centimeter.

Voor de geaccumuleerde deeltjes is deze waarde voor een doorsnee urbane aerosol $3,2 \times 10^{10}$ deeltjes per kubieke meter. Dit geeft een aantal van 32.000 geaccumuleerde deeltjes per kubieke centimeter.

Voor de achtergrond deeltjes is deze waarde voor een doorsnee urbane aerosol $5,4 \times 10^6$ deeltjes per kubieke meter. Dit geeft een aantal van 5,4 achtergrond deeltjes per kubieke centimeter.

Voor de TU Delft fijnstof innovatie, het gebruikte CleanAir systeem TU Delft/BAM, worden slechts de geaccumuleerde- en de achtergrond deeltjes geladen door het systeem, omdat deeltjes van 10 nanometer grootte bijna niet opgeladen worden. Verder zullen de ultra deeltjes, ofwel 10 nm deeltjes, vrij snel geaccumuleerd worden tot clusters, welke weer een grootte hebben van de hierboven genoemde geaccumuleerde deeltjes.

Verder wordt er gesteld dat de deeltjes, die met ventilatie de tunnel verlaten, allemaal opgeladen zijn en dat in de hele periode het volume aan lucht van het begin tot het einde door de tunnel zal stromen. **Het is duidelijk dat wij dan uit gaan van de maximaal mogelijke oplading!**

Uit de tunnel stroomt per tijdseenheid $Q = v \times A$, ofwel $7 \text{ m/s} \times 14 \text{ m} \times 4,5 \text{ m} = 441 \text{ m}^3/\text{s}$

We nemen in de tunnel aan dat de concentratie van deeltjes gelijk is aan 100 keer de gemiddelde aerosolwaarde van urbane gebieden, zoals in onderstaand figuur 1.7 (Hinds, 1999).

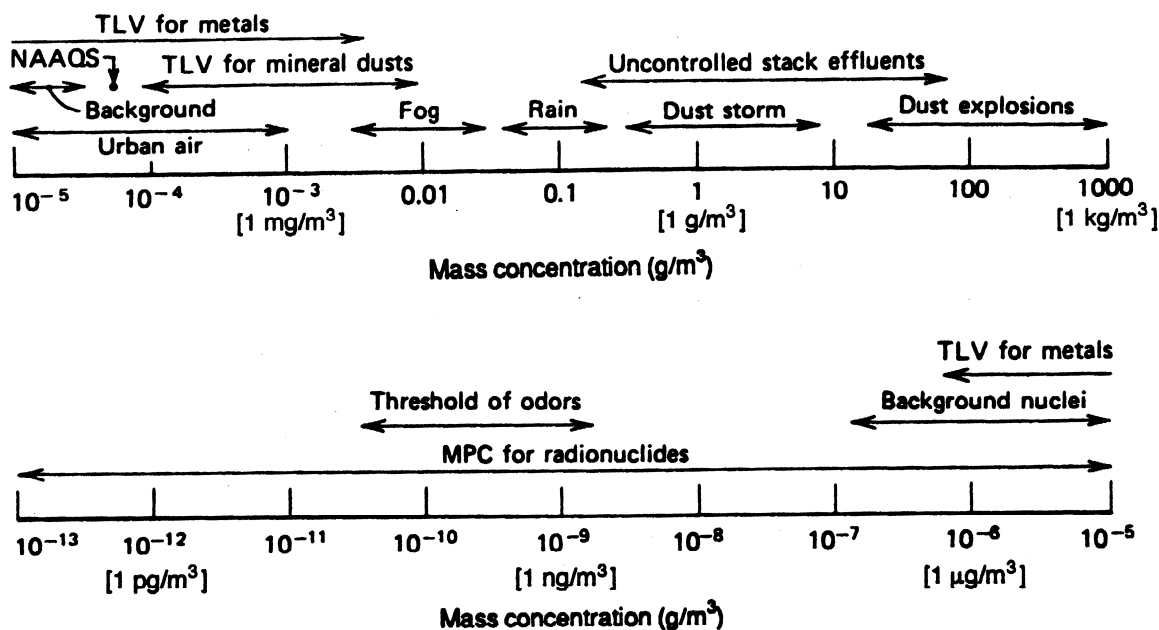


FIGURE 1.7 Range of aerosol concentration.

Scenario 1, vocht heeft invloed op deeltjes grootte en er is relatief veel lading beschikbaar voor het opladen van fijnstof

We nemen een diameter voor de accumulatie deeltjes van $d_{pa} = 100 \text{ nm} = 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ en als diameter voor de achtergrond deeltjes van $d_{pc} = 3 \text{ }\mu\text{m}$ (zie figuur 2, Hinds).

Dus zijn er $3,2 \times 10^{12}$ geaccumuleerde deeltjes in de tunnel per kubieke meter met een diameter van $d_{pa} = 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ en $5,4 \times 10^8$ achtergrond deeltjes in de tunnel per kubieke meter met een diameter van $d_{pc} = 3 \text{ }\mu\text{m}$ (tabel 14.3, Whitby, 1978).

Het totaal aantal deeltjes dat per seconde zal uitstromen in de lucht:

$$d_{pa} = 0,1 \text{ }\mu\text{m}: 441 \text{ m}^3/\text{s} \times 3,2 \times 10^{12}/\text{m}^3 = 1,41 \times 10^{15}/\text{s}$$

$$d_{pc} = 3 \mu\text{m} \cdot 441 \text{ m}^3/\text{s} \times 5,4 \times 10^8 / \text{m}^3 = 2,38 \times 10^{11}/\text{s}$$

Het aantal ionen dat dus per seconde geproduceerd wordt, zal dan zijn:

Stroomsterkte in de coronadraden x aantal rekken x aantal lengte meters draad per rek, ofwel
Elk rek bestaat uit twee draden van 6 meter.

$$1,75 \times 10^{-6} \text{ A/m} \times 24 \times 12\text{m} = 5,04 \times 10^{-4} \text{ A} = 5,04 \times 10^{-4} \text{ Coulomb/seconde}$$

Gegeven is dat de elementaire lading is $1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb lading.

Dit betekent dat er per seconde de volgende elementaire ladingen (ionen) ontstaan:

$$5,04 \times 10^{-4} / 1,6 \times 10^{-19} = 3,15 \times 10^{15} \text{ ionen/seconde}$$

Wanneer een diffusie oplading wordt beschouwd en we nemen de gegevens uit onderstaande grafiek 15.3 (Hinds, 1999) met $N_{it} = 10^{13} \text{ ion.s/m}^3$ en een verhouding van ionen op deeltjes van (zie ook in onderstaande grafiek 15.3, Hinds, 1999).

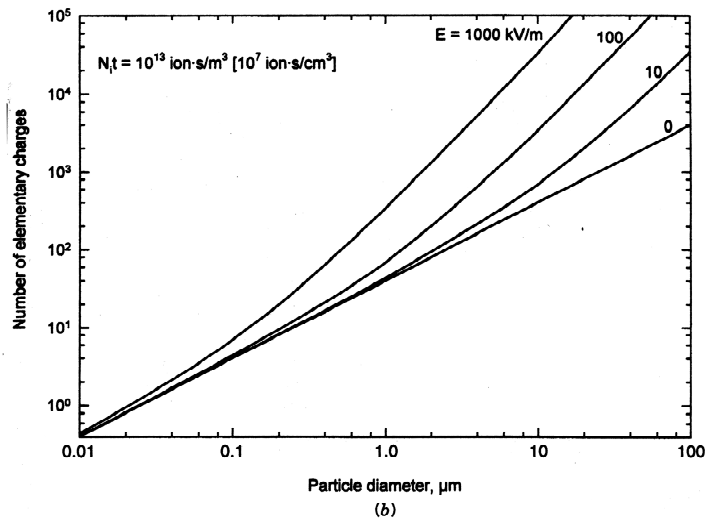


FIGURE 15.3 Field and diffusion charging. (a) Number of charges acquired versus N_{it} for particle diameters of 0.1, 1, and 10 μm at a field strength of 500 kV/m [5 kV/cm]. (b) Number of charges acquired versus particle diameter for field strengths of 0, 100, 1000, and 10,000 V/cm at $N_{it} = 10^{13} \text{ s/m}^3 [10^7 \text{ s/cm}^3]$. $\epsilon = 5.1$.

Figuur 15.3 (Hinds, 1999)

Als we bovendien ook de ultra kleine deeltjes meenemen, dan zijn dat per seconde, bij aanname voor de tunnel van 100 x de gemiddelde urbane aerosolen (zie tabel 14.3, Whitby, 1978):

$$1,06 \times 10^{13} \times 441 = 4,67 \times 10^{15} \text{ ionen/seconde}$$

Als we de oplading beschouwen uit figuur 15.3 (Hinds, 1999), dan levert dat een verhouding op van:

$$d_{pn} = 0,01 \mu\text{m} : d_{pa} = 0,1 \mu\text{m} : d_{pc} = 3 \mu\text{m} = 4 \times 10^{-1} : 4 \times 10^0 : 10^2 = 0,4 : 4 : 100$$

Dit betekent dat de ladingen op de deeltjes volgens vergelijkbare berekening worden:

$$(4,67 \times 10^{15}) \times (0,4 \times Y) + (1,41 \times 10^{15}) \times (4 \times Y) + (2,38 \times 10^{11}) \times (100 \times Y) = 3,15 \times 10^{15}$$

$$Y = 0,4182$$

Op deeltjes van 10 nanometer grootte ($d_{pn} = 0,01 \mu\text{m}$) zijn dat ($0,4 \times Y = 0,167$) 0 ladingen

Op deeltjes $d_{pa} = 0,1 \mu\text{m}$ zijn dat ($4 \times Y = 1,67$) 2 ladingen

Op deeltjes $d_{pc} = 3 \mu\text{m}$ zijn dat ($100 \times Y = 41,8$) 42 ladingen

Bovenstaande waarden zijn de maximaal mogelijke bereikbare ladingen indien er geen rekening gehouden wordt met de luchtvochtigheid en er geen temperatuur invloed gerelateerd aan de relatieve luchtvochtigheid aanwezig is en alle deeltjes maximaal geladen kunnen worden!

In praktijk is de relatieve luchtvochtigheid in Nederland $RV > 50\%$, zodat zeker ruimtelading verloren zal gaan aan natuurlijke aanwezige waterdeeltjes en een grotere conductiviteit aan watergeleiding aan de wand.

In praktijk is het niet onmogelijk dat slechts de effectieve stroomsterkte op de draad voor 10% ten goede komt aan het opladen van het geaccumuleerde antropogene- en achtergrond fijnstof. Uit metingen in Zwammerdam blijkt deze aanname realistisch te zijn.

Scenario 2, vocht heeft invloed en er is een meer realistische hoeveelheid lading beschikbaar voor het laden van fijnstof

Hierbij is een beschikbare stroomsterkte van $I = 12,6 / 12 \text{ meter } 1,05 \times 10^{-6} \text{ A/m}$, welke gebruikt kan worden voor oplading van alle fijnstof deeltjes (geaccumuleerde antropogene- en achtergrond deeltjes) in de tunnel.

Dit betekent een volgende stroomsterkte:

$$1,05 \times 10^{-6} \text{ A/m} \times 24 \times 12 \text{ m} = 5,04 \times 10^{-4} \text{ A} = 3,024 \times 10^{-4} \text{ Coulomb/sec}$$

Dit betekent, dat er per seconde de volgende elementaire ladingen (ionen) ontstaan:

$$3,024 \times 10^{-4} / 1,6 \times 10^{-19} = 1,89 \times 10^{15} \text{ ionen/seconde.}$$

Bij een maximale oplading van alle fijnstof deeltjes betekent dit in ladingen per deeltje:

$$(4,67 \times 10^{15}) \times (0,4 \times Y) + (1,41 \times 10^{15}) \times (4 \times Y) + (2,38 \times 10^{11}) \times (100 \times Y) = 1,89 \times 10^{15} \text{ ionen/s}$$

$$Y = 0,251$$

Op deeltjes van 10 nanometer grootte ($d_{pn} = 0,01 \mu\text{m}$) zijn dat ($0,4 \times Y = 0,1004$) 0 ladingen.

Op deeltjes $d_{pa} = 0,1 \mu\text{m}$ zijn dat ($4 \times Y = 1,004$) 1 lading.

Op deeltjes $d_{pc} = 3 \mu\text{m}$ zijn dat ($100 \times Y = 25,1$) 25 ladingen.

Scenario 3, vocht heeft geen invloed op de deeltjes grootte en er is relatief veel lading beschikbaar

Stel dat er wordt uit gegaan van een maximale veld lading en een maximale diffusie lading met een rek lading van $390 \mu\text{A}$, dan komen we tot de volgende berekening bij aanname dat:

Stroom per rek:	390 [μA]
Aantal rekken	24
Beschikbare lading:	$24 \cdot 390 [\mu\text{A}] = 9,4 \text{ mA}$
Sluipstroom naar muur:	90%
Sluipstroom via vocht en overige deeltjes	50%
Beschikbare lading voor opladen aerosol:	$0,47 [\text{mA}] (0,1 \cdot 0,5 \cdot 9,4 [\text{mA}])$
Debiet	$441 [\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$
Beschikbare lading concentratie:	$1,065 \cdot 10^{-6} [\text{Cm}^{-3}]$ $(0,47 \cdot 10^{-3} [\text{Cs}^{-1}] / 441 [\text{m}^3 \text{s}^{-1}])$ $= 6,66 \cdot 10^{12} \text{ em}^{-3}$

Verdeling deeltjes:

Naam	CMD [μm]	Aantal [$\#\cdot\text{m}^{-3}$]	Lading verhouding	Toelichting
Nuclei	0,014	$106\cdot 10^{11}$	0,7	Tabel Whitby vermenigvuldigd met 100
Accumulation	0,054	$32\cdot 10^9$	2	Tabel Whitby vermenigvuldigd met 1
Article	Coarse P0,86	$5,4\cdot 10^3$	25	Tabel Whitby vermenigvuldigd met 1

Wederom betekent dit in ladingen per deeltje:

$$(106 \times 10^{11} [\#\text{m}^{-3}]) \times (0,7 \times \mathbf{X}) + (32 \times 10^9 [\#\text{m}^{-3}]) \times (2 \times \mathbf{X}) + (5,4 \times 10^3 [\#\text{m}^{-3}]) \times (25 \times \mathbf{X}) = 6,66 \cdot 10^{12} [\text{em}^{-3}]$$

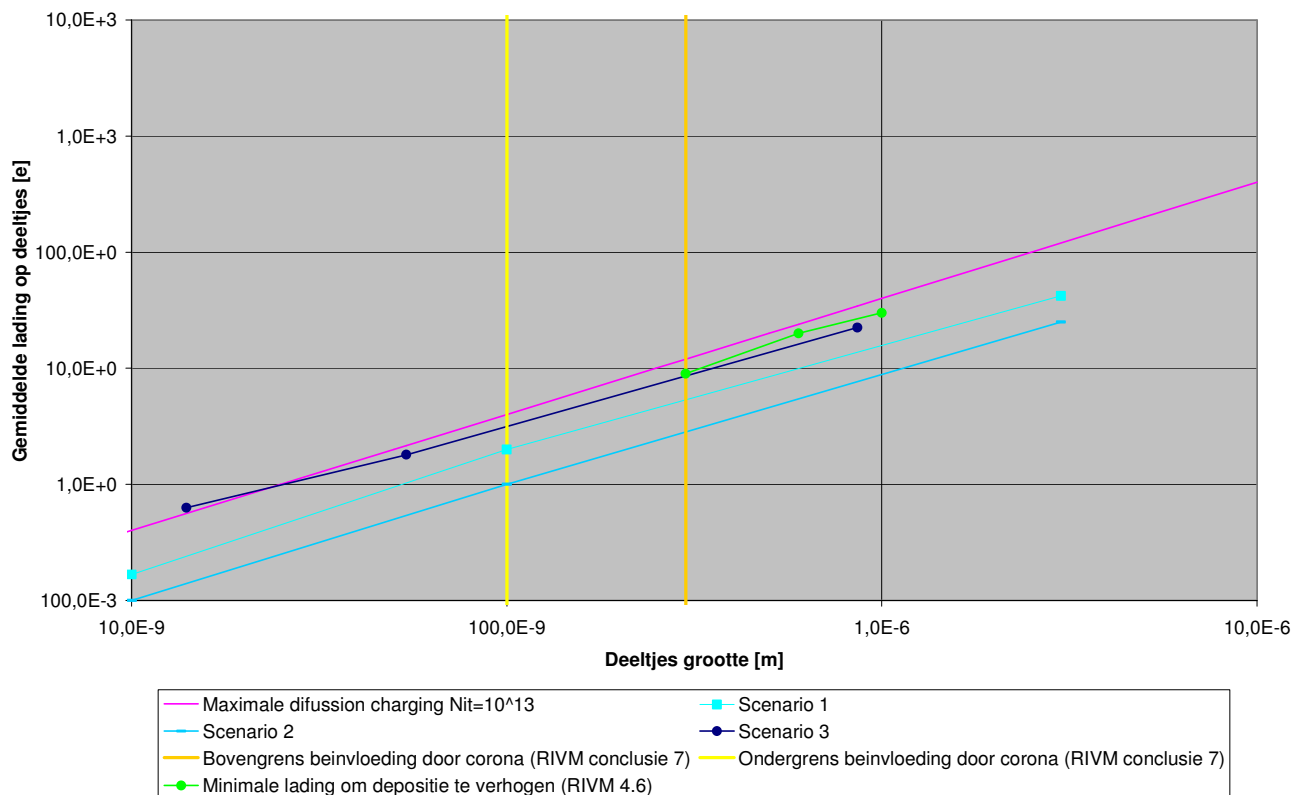
$$\mathbf{X} = 0,9$$

Lading op de deeltjes wordt:

Naam	CMD [μm]	Gemiddelde lading
Nuclei	0,014	0,6 ^e
Accumulation	0,054	1,8 ^e
Coarse Particle	0,86	22,5 ^e

De maximale diffusie lading wordt bepaald volgens figuur 15.3 pagina 8 (Hinds, 1999), dan kunnen we de onderstaande grafiek van mogelijke lading op deeltjes opstellen.

Mogelijke lading op deeltjes



Grafiek van mogelijke ladingen op deeltjes

Conclusie

Uit de grafiek van mogelijke ladingen op deeltjes kan men concluderen dat alle waarden van veldoplading (maximaal en minimaal geladen) onder de grens liggen van de maximale diffusie lading

($N_{it} = 10^{13}$) liggen. Alleen in het heel kleine gebied, echter ver beneden de diameter waarde van $d_p < 0,1 \mu\text{m}$, zou de ladingswaarde per deeltje iets hoger kunnen liggen. Maar uitgaande van het RIVM rapport 610790001 hebben corona-ontladingen op deeltjes $d_p < 0,1 \mu\text{m}$ geen invloed.

Bovendien geldt dat deze ook op natuurlijke wijze geladen kleine deeltjes aanwezig zijn volgens de Boltzmann verdeling, welke gegeven in tabel 15.4 (Hinds, 1999)

TABLE 15.4 Distribution of Charge on Aerosol Particles at Boltzmann Equilibrium

Particle Diameter (μm)	Average Number of Charges	Percentage of Particles Carrying the Indicated Number of Charges								
		< -3	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	>+3
0.01	0.007				0.3	99.3	0.3			
0.02	0.104				5.2	89.6	5.2			
0.05	0.411			0.6	19.3	60.2	19.3	0.6		
0.1	0.672		0.3	4.4	24.1	42.6	24.1	4.4	0.3	
0.2	1.00	0.3	2.3	9.6	22.6	30.1	22.6	9.6	2.3	0.3
0.5	1.64	4.6	6.8	12.1	17.0	19.0	17.0	12.1	6.8	4.6
1.0	2.34	11.8	8.1	10.7	12.7	13.5	12.7	10.7	8.1	11.8
2.0	3.33	20.1	7.4	8.5	9.3	9.5	9.3	8.5	7.4	20.1
5.0	5.28	29.8	5.4	5.8	6.0	6.0	6.0	5.8	5.4	29.8
10.0	7.47	35.4	4.0	4.2	4.2	4.3	4.2	4.2	4.0	35.4

Tabel 15.4 Hinds,1999

De Boltzmann verdeling in de natuur is voor $0,01 \mu\text{m}$ (10 nanometer) grootte 1 lading negatief : neutraal : 1 lading positief = 0,3 : 99,3 : 0,3. (zier tabel 15.4, Hinds 1999). Dit betekent dat slechts 0,3 positief, dan wel respectievelijk negatief geladen is. Ofwel 0,3 % van 1/10 van alle deeltjes, welke 3 op de duizend nanodeeltjes een positieve, dan wel een negatieve lading hebben.

De snelheid van deze 10 nanometer deeltjes wordt gegeven in de formule van de elektrische mobiliteit:

$$V_{TE} = Z \times E = neC_c / 3\pi\eta d \times E = (2,1 \times 10^{-6}) \times (10 \times 10^3) = 2,1 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

(V_{TE} is de snelheid = elektrische mobiliteit x elektrisch veld = (aantal ladingen x de Cunningham slip factor / $3(\pi) \times$ (viscositeit) x de diameter van het deeltjes) x de elektrische mobiliteit)

De snelheid van deze nano deeltjes is uiterst laag, zodat er gesteld kan worden dat alle geladen en neutrale deeltjes in de tijd gemakkelijk ingevangen kunnen worden door grotere deeltjes via accumulatie of door elektrische aantrekkingskracht. In ieder geval worden de negatief geladen deeltjes (hoe klein de fractie ten opzichte van het totaal ook is) onmiddellijk aangetrokken en afgevangen door de enorme aantallen positief geladen grotere deeltjes. Uiteindelijk blijft er een geringe rest van nano deeltjes over met maximaal 1 positieve lading en een zeer geringe mobiliteit, ofwel 3 deeltjes op de duizend aanwezige deeltjes volgens de natuurlijke Boltzmann verdeling. .

Vergelijking met hoogspanningslijnen en normen.

In een recent RIVM rapport (2007) is de relatie onderzocht tussen hoogspanningslijnen en fijnstof depositie. Het RIVM rapport geeft aan dat fijn stofdeeltjes in de directe omgeving van hoogspanningsdraden, op twee manieren worden beïnvloed.

Het eerste is, dat door corona gas ontladingen op de spanningsvoerende draden die maakt dat een passerend fijn stof deeltjes door de vrijkomende ionen elektrisch worden geladen of hun lading niveau verandert. Ten tweede dat die geladen deeltjes door de aanwezigheid van wisselspanning op de hoogspanningsleiding gaan oscilleren.

Gezondheidsdocument, Revisie 2, 10 september 2009

Volgens deze literatuurstudie worden de door de corona geproduceerde lucht ionen, op grote afstand aan getroffen (orde grootte enkele honderden meters) van de hoogspanningslijnen. De basis van het rapport is het idee dat deze ionen zwevend fijnstof kunnen laden dat bij inademen tot een extra depositie in de luchtwegen zou kunnen leiden. De oscillerende beweging van de geladen deeltjes zou in die context kunnen leiden tot extra depositie op de huid.

Uit het rapport blijkt dat bij hoogspanningsleidingen de fijnstofdeeltjes waarschijnlijk worden opgeladen, afhankelijk van de grootte van het deeltje, tot waarden tussen 0,1 tot 0,9 elementaire lading. Deze geringe waarden zijn het gevolg van het feit dat we hier voornamelijk te maken hebben met elektrische veldlading en vervolgens, verder van de bron, met een diffusie ladingsmechanisme, zie ook Hinds (1982).

Een verhoogde depositie van fijnstof deeltjes in de longen verwacht het rapport, als er meer dan 10 elementaire ladingen per fijn stofdeeltje aanwezig zijn en dat het deeltje kleiner is dan een diameter van $d_p < 0,1 \mu\text{m}$. Het rapport komt tot de conclusie dat zowel op theoretische gronden als wel epidemiologisch literatuur onderzoek, wat betreft de combinatie hoogspanningsleidingen en fijnstof geen nadelige effecten op de gezondheid zijn aangetoond. De oscillerende beweging van de fijnstofdeeltjes zou theoretisch de kans op huidproblemen, met als extreem kanker, kunnen vergroten, maar ook dit kan echter ook niet middels epidemiologisch onderzoek worden aangetoond.

Zoals gezegd het TUD/BAM CleanAIR systeem verschilt zowel qua eigenschappen, zie tabel 1, en als verschijningsvorm fundamenteel van een hoogspanningslijn.

Nr	eigenschap	hoogspanningsleiding	TUD fijnstof innovatie/ TUD/BAM CleanAIR
1	Doel	Transport energie	Generen statisch elektriciteit
2	Spanning	Wisselspanning 50-350 KVe _{eff} geeft 140-980KV p-p = wisselspanning	25-35 KV gelijkspanning
3	Systeem stroom	$I \gg 100 \text{ A}$	Ca. 12,6 $\mu\text{A/m}$ per draad
4	lading	Discontinu	Continu
5	locatie	Matig tot grote hoogte	Straat niveau
6	Aanbod deeltjes	achtergrond waarde tot $3,2 \times 10^{10}$ deeltjes /m ³	in tunnel 100 x achtergrondwaarde tot $3,2 \times 10^{12}$ deeltjes/m ³

Tabel 1

De overeenkomst is dat zowel TUD/BAM CleanAIR, als hoogspanningsleidingen door corona gevormde gas ionen, in staat zijn de elektrische lading op de fijnstofdeeltjes te veranderen. Bij hoogspanninglijnen zijn de corona verliezen zeer variabel en nagenoeg niet controleerbaar. Daar en tegen bij het TUD/BAM CleanAIR systeem is de ionen emissie constant, dankzij de afwezigheid van een belasting en de aangelegde gestabiliseerde gelijkspanning. Zowel deze spanning als de ionen productie worden constant gemeten, waardoor het ladings mechanisme door middel van positief geladen ionen volledig onder controle blijft. Oscillatie van fijnstof deeltjes kan niet optreden in het geval van het TUD/BAM CleanAIR systeem, dankzij de gelijkspannings voeding. In het geval van hoogspannings lijnen liggen de zaken geheel anders. Niet alleen handelt het hier om wisselspanning die elke 10 ms van polariteit verandert en waarvan de spanning piekwaarden heeft die 4 tot 28 maal hoger zijn dan die maximaal gebruikt worden in het TUD/BAM CleanAIR systeem.

Bij hoogspannings lijnen kunnen deeltjes een elektrische veldlading krijgen, Hinds (1982), als er bijvoorbeeld sprake is een drie fasen systeem en de deeltjes zich tussen de draden bevinden. Door veldlading kan de lading op de deeltjes vele malen grote zijn dan in geval van diffusie lading. Bij TUD/BAM CleanAIR en bij hoogspanningslijnen in de drift zone, tussen de draden en de aarde, zal een combinatie van veldlading en diffusie lading van fijnstof deeltjes plaatsvinden. De hoeveelheid lading dat een fijn stofdeeltje zal afvangen is afhankelijk van de oorspronkelijke lading op de fijn stofdeeltjes; de

Gezondheidsdocument, Revisie 2, 10 september 2009

mechanische en elektrische mobiliteit van de fijnstof deeltjes; de verblijfstijd van de deeltjes in de ladings zone; de beschikbare hoeveelheid lading, en uiteraard, het aantal deeltjes die in het ladingsveld aanwezig zijn. Een van de weinige punten van vergelijking is de corona stroom. Een hoogspanningsleiding kent netto lekverliezen, afhankelijk van de auteur, die variëren van 10 mA/m, 1mA/m tot 0,1 mA/m. De spreiding in de verlies stroom is minder verwonderlijk dan het lijkt. Immers de verhouding in spanning voor de bekeken hoogspanningslijnen is een factor 10. De relatie spanning stroom in het corona regime is kwadratisch, en dus een factor 100. Deze netto lekverliezen vormen de bron van elementaire lading voor het opladen van de fijnstof deeltjes .

Als het hoogspanningsstelsel bestaat uit een aantal lijnen waarvan de fasen verschillend zijn, dan zullen op een bepaald moment de geproduceerde positieve ionen door het zeer krachtige elektrische veld naar een op dat moment negatieve geleider worden getrokken. De zich, tussen de geleiders bevindende deeltjes, zullen op deze wijze een flinke lading krijgen. Het is dan ook beter om over de piek waarden van de wisselspanning te spreken dan over de efficiënte waarden, zoals gebruikelijk is. De afstand tussen de hoogspanningslijn en de grond is vaak een tiental meters en het is ook in deze drift regio dat de zich daarin bevindende ionen atmosferische fijnstofdeeltjes zullen opladen via elektrische veldlading en vervolgens het diffusie mechanisme.

Het TUD/BAM CleanAIR systeem zoals dat voor een tunnel is ontworpen, heeft een corona ontladings stroom van maximaal 42 $\mu\text{A}/\text{m}$ begrensd waarde. Dit dank zij een elektronische begrenzing. Het TUD/BAM CleanAir systeem is opgehangen in een metalen frame. Metingen hebben aangetoond dat minstens 50% van de corona ontlading direct via deze constructie terug zal afvloeien naar de aarde. De lekkage aan de wand is 50%, die door het metalen constructieframe direct via geleiding aan de wand verloren zal gaan. Bovendien is door de in Nederland hoge relatieve luchtvochtigheid er ook een verlies aan beschikbare oplading. Als bron voor het opladen van fijnstofdeeltjes met elementaire lading, is dus maximaal 30% en dus 12,6 $\mu\text{A}/\text{m}$ beschikbaar.

Het TUD/BAM CleanAIR systeem wordt op dit moment over 200 m per kilometer tunnel lengte toegepast. Een dekkingsgraad van 20%. Als we een vergelijking maken tussen de in de drift zone aanwezige lading bij de hoogspanningslijn en het TUD/BAM CleanAIR systeem per kilometer lengte, dan krijgen we het volgende:

$$\text{Ratio} = \text{Lekstroom per kilometer} / (\text{Effectieve coronastroom} \times \text{dekkingsgraad})$$

Dit levert voor Ratio waarden op die variëren tussen 0,11 en 5 Anders gezegd: de ladingscapaciteit van fijnstofdeeltjes is voor hoogspanningsleidingen beduidend zeer veel hoger dan dat van het TUD/BAM CleanAIR systeem. Maar dit is nog niet alles. Uit metingen is ook gebleken dat de landelijke achtergrond waarden voor fijnstofdeeltjes in Nederland tot zo'n $5,4 \times 10^6$ deeltjes met een diameter van 0,86 μm per m^3 bedraagt. Het laden van fijnstof deeltjes vindt bij TUD/BAM CleanAIR direct plaats, door de uitstoot van het verkeer. Bij testen in een proeftunnel met een mengsel van buitenlucht en uitlaatgassen worden fijn stof concentraties tot meer dan 3×10^{10} deeltjes per m^3 gemeten met een condensation nucleus counter (CPC). Voor het aanbrengen van lading op deeltjes, is het product- aantal deeltjes maal de tijd dat een deeltje aan de aanwezige ionen wordt blootgesteld- een basis gegeven. Ter vereenvoudiging nemen we aan, dat de expositie tijd voor beide systemen gelijk is. Immers in de buitenlucht kan de luchtsnelheid variëren van bladstille lucht tot een storm; terwijl in een tunnel, het, in het algemeen om voorbij razend verkeer handelt. Dit betekent dat de ladingsgraad op de deeltjes afhankelijk wordt van het aantal in de drift zone aanwezige deeltjes.

Als we nu een vergelijking maken tussen de hoeveelheid deeltjes waar beide systemen mee te maken hebben, dan krijgen we de volgende beschikbaarheids graad (B):

$$B = \text{fijnstof concentratie achtergrond} / \text{fijnstof concentratie door verkeer} + \text{achtergrond}$$

Dit levert voor B waarden op, die variëren tussen 0,1 en 0,00166 . Wat betekent, dat de beschikbare lading per deeltje door het TUD/BAM CleanAIR systeem veel kleiner is, dan de beschikbaarheid van lading per deeltje door hoogspanningslijnen. Zoals we gezien hebben, is de ladingscapaciteit van hoogspanningsleidingen minimaal een factor 12,5 maal groter dan dat van het CleanAIR systeem. De

feitelijke oplading van de deeltjes is deze ladingscapaciteit gedeeld door het beschikbare aantal deeltjes. De maximale beschikbaarheidsgraad is 0,1.

Dit maakt, dat de gemiddelde beschikbare lading per fijnstof deeltje als gevolg van het TUD/BAM CleanAIR systeem, volgens deze redenering, op zijn minst 125 maal lager is dan welke hoogspanningslijn dan ook. Aangezien de conclusie van het RIVM rapport was, dat hoogspanningsleidingen geen gevaar opleveren in combinatie met fijnstof, zou het zelfde gezegd kunnen worden met betrekking tot het TUD/BAM CleanAIR systeem.

Elektrische veiligheid

Het Kema (2006) rapport geeft conclusies en aanbevelingen aangaande de veiligheids aspecten van het TUD/BAM CleanAIR systeem. Ten aanzien van de veiligheid voor personen geldt de Richtlijn van de Gezondheidsraad. Die geeft aan dat er geen probleem is wat betreft de op het systeem aangelegde spanning. De uiterst lage stroom van het TUD/BAM CleanAIR systeem maakt, dat nagenoeg geen magnetisch veld wordt ontwikkeld. Wat betreft de continue aanrakingstroom; deze mag maximaal 0,5 mA zijn.

Deze waarde wordt door een stroombegrenzing circuit bij het TUD/BAM CleanAIR systeem gegarandeerd. Er is uiteraard voor gezorgd dat het systeem aan de NEN 1010 norm voldoet, een eis door de overheid gesteld voor aanbestedingen.

Ten aanzien van de eventueel toepasbare normen aangaande gelijkspanning hoogspanninginstallaties, kan voor de tunnel toepassing worden gezegd, dat het systeem in principe niet aanraakbaar is. Dat veel zorg is besteed aan betrouwbaarheid, onderhoud, materialen, ontwerp parameters etc. Gezien het feit dat er geen sprake is van vermogensoverdracht, vervallen vele eisen, of worden ze tot een minimum beperkt, zoals aarding, uitvoering, funderingen, geleiders en isolatoren.

Wat betreft de vervuiling van het systeem: dit wordt constant op elektronische wijze in het oog gehouden. Bij plaatsing van het TUD/BAM CleanAIR systeem in een tunnel zijn de aanbevelingen ten aanzien van bliksem beveiliging niet relevant. Bij toepassing in de open lucht moet uiteraard aan dit aspect volle aandacht worden besteed.

Wat betreft de veiligheidsaspecten ten opzichte van andere systemen, hebben we te maken met EMC-richtlijnen, corona en ozon generatie en verstoorde radio ontvangst. De EMC richtlijnen leveren in principe geen probleem op, gezien het feit dat het hier een gelijkspanningsstelsel betreft waarbij geen grote stromen kunnen lopen. Metingen gedaan op objecten zoals vervoersmiddelen in de buurt van het TUD/BAM CleanAIR systeem, hebben geen noemenswaardige oplading kunnen constateren. Van belang is te onderzoeken of externe systemen ,waar af en toe zeer grote stromen kunnen lopen, zoals bijvoorbeeld bij de HSL lijn, geen versturende werking op het systeem hebben. Wat betreft het ontladingsregime, dit is onder normale omstandigheden niet hoorbaar nog zichtbaar. De positieve polariteit maakt dat geen ozon geproduceerd wordt. Het mag worden aangenomen dat ook radio ontvangst, voor zover dat in een tunnel mogelijk is, er niet door beïnvloed wordt.

SLOTBESCHOUWING

Vastgesteld kan worden dat berekend en onderbouwd met de grafiek van mogelijke ladingen op deeltjes men kan concluderen dat alle waarden van veldoplading (maximaal en minimaal geladen) onder de grens liggen van de maximale diffusie lading ($N_{it} = 10^{13}$) liggen. Alleen in het heel kleine gebied, echter ver beneden de diameter waarde van $d_p < 0,1 \mu\text{m}$, ligt de ladingswaarde iets hoger per deeltje. Maar uitgaande van het RIVM rapport 610790001 hebben corona-ontladingen op deeltjes $d_p < 0,1 \mu\text{m}$ geen invloed.

Voorts kunnen we stellen dat bij de meest ongunstige situatie met een constante hoeveelheid deeltjes en totaal geen afvangst berekend is dat er geen overschrijding van ladingen per deeltje kunnen zijn. Dat de deeltjes door dit elektrostatische systeem van laden at random gebeurd en dat de afvangst voornamelijk op de geladen deeltjes plaats vindt. Deze geladen deeltjes zijn positief geladen en bewegen zich per definitie in het aard elektrisch veld en het aangelegde elektrische veld naar de gearde counter elektrode, ofwel het gearde afvanggaas. Aangezien we mogen uit gaan van een aantal van 100 x de urbane deeltjes wordt daarmee de grootste trefkans gecreëerd dat deeltjes met elementaire lading ook geraakt worden. Dus alle aanwezige deeltjes fijnstof kunnen geladen worden. De maximale elektrische capaciteit van het TUD/BAM CleanAIR systeem is begrensd op 380 microAmpere. De lading kan niet worden opgedrongen op de fijnstof deeltjes. Bij het opladen is er sprake van een evenwicht, zodat lagere amperewaarden in de praktijk zullen optreden dan 380 microAmpere.

De metingen van de TU Delft in de proeftunnel van Zwammerdam hebben vastgesteld dat er een lek is aan de wand en luchtvochtigheid. De luchtvochtigheid is weer gerelateerd aan de temperatuur. In de proeftunnel is deze waarde een factor 10, zodat de beschikbare amperage 10 X lager is dan aangelegd op de draad, ofwel 1 op de 10 elementaire ladingen is beschikbaar voor het opladen van deeltjes fijnstof in de ruimte rond de draad. Nog een onbekend aantal ladingen zal alsnog de wand raken en niet ten goede komen aan de oplading van de fijnstof deeltjes. Dus de netto capaciteit per rek is maximaal 38 microAmpere. Vlak bij de draad is oplading door veldlading, echter direct van de draad is er uitsluitend sprake van diffusie lading. Dus is de lading op het volume van de totale tunneldoorsnede verwaarloosbaar.

Deeltjes groter dan $d_p > 3 \mu\text{m}$ volgen het mechanisme van impactie en dus zullen in de nasopharynx regio worden ingevangen en niet de longen bereiken. Deeltjes kleiner dan $d_p < 0,01 \mu\text{m}$ volgen het depositie mechanisme van diffusie. Het tussengebied heeft een depositie mechanisme dan grootte en ladings afhankelijk is. Hierbij moet worden aangetekend, dat corona ontlading nimmer op deze deeltjesgrootte een invloed heeft (zie rapport RIVM 610790001/2007). De lading op deeltjes blijft onder het kritieke punt.

Referenties

- Aitken, J. (1880) On dust, fog and clouds, *Trans. R. Soc. Edinb.* 30, pp 337-368
- d'Almeida, G. A. (1984) Sahara desert dust transport to the south. *Proc. 11th Int. Conf. On Atm. Aerosols, Condensation and Ice Nuclei*, 3-8 Sept., Budapest, Preprint Vol. I, pp. 185-190.
- Bertholon, Abbé P. (1783) *Electricité des végétaux*.
- Blanchard, D. C. 1967 *From Raindrops to Volcanos*, Dover Publications Inc.
- Brillouin, M. (1897) L'électricité atmosphérique, *Ecl. Elec.* 12, pp 577-599
- Busch, B., Ferron, G., Karg, E., Solberg, A., Heyder, J., *Journal Aerosol Sciences* 25 (1984) S 143-144
- CBS (2008) *Gezondheid en zorg in cijfers 2008*
- Cohen, B. S. (1996) *Aerosol Inhalation: Recent Research Frontiers*, Ed. Marijnissen et al. Kluwer Academic Publishers. pp 153-164
- Coulier, M. (1875) Note sur une nouvelle propriété de l'air, *J. Pharm. Chim.*, Paris 22, 165
- Ferron, G.A., Haider, B., Kreyling, W.G., *Aerosol Sci.* 15 (1984) 211-215
- Ferron, G.A., Busch, B. (1996) *Aerosol Inhalation: Recent Research Frontiers*, Ed. Marijnissen et al,
- Hicks, J.F., Megaw, W.J., *Journal Aerosol Sci.* 16 (1985) 521-527
- Kluwer Academic Publishers, pp 153-164
- Gilbert, W. (1600) *De magnete, magneticisque corporibus et de magno magnetis tellure*.
- Hinds, W. C. (1982) *Aerosol Technology*, Wiley and Sons Inc.
- Jallembert, J. (1749) *Experiences sur l'électricité*
- Kema (2006) *Notitie Veiligheidsaspecten Systeem Luchtreiniging*
- Koren, I. (2006) The Bod'el'e depression: a single spot in the Sahara that provides most of the mineral dust to the Amazon forest. *Environ. Res. Lett.* 1(2006) 014005 (5pp)
- Le Cadet, G. (1898) Etude de champ électrique de l'atmosphère, *Ann. Univ. Lyon.* 35
- Lenard, P. (1892) Über die Elektrizität der Wasserfälle, *Ann. Phys. Lpz.* 46, pp 584-636
- Melandri, C. (1977) On the deposition of unipolar charged particles in the human respiratory tract. *Inhaled particles IV*, Ed. Walton, Pergamon Press Oxford, pp 193-200
- McMurray, P.H., Stolzenburg, M.R., *Atmosph. Environm.* 23 (1989) 497-507
- Melandri, C. (1983) Deposition of charged particles in the human airways, *J Aerosol Sci.* 14, pp 184-186
- Nollet, Abbé J. A. (1754) *Recherches sur les causes particulières des phénomènes électriques*.
- Prodi, V. (1985) Electrostatic lung deposition experiments with humans and animals, *Ann. Occ. Hyg.* 29, pp 229 - 240
- RIVM rapport (2007) *Hoogspanningslijnen en fijn stof, Rapport 610790001/2007*
- Roos, R. A. (1996) *The Forgotten Pollution*, Kluwer Academic Publishers
- Schutz, L. (1987) Mineral Aerosols and Source *J. Aerosol Sci.*, Vol. 18, No. I, pp. 1-10,
- TNO (2007) *Onderzoek naar het effect van retrofit roetfilters op emissies van personenwagens met een dieselmotor, MON-RPT-033-DTS-2007-02842*
- Thomson, J. J. (1898) On the charge of electricity carried by the ions produced by Röntgen rays, *Phil.Mag.* 46, pp 528-545
- Wilson, C. T. R. (1899) On the comparative efficiency as condensation nuclei of positively and negatively charged ions. *Phil. Trans. A*, 193, pp 289-308.