

Direct uitlezende stofmonitoren in de praktijk

Een vergelijkend onderzoek naar de prestaties van de Grimm, DustTrak, DataRAM en MiniRAM

H.J.F. Jansen, J.P. Zock, H. Kromhout¹

Samenvatting

De Grimm, DustTrak, DataRAM en MiniRAM zijn direct uitlezende stofmonitoren die werken op basis van lichtverstrooiing. De apparaten verschillen in gemeten deeltjesgrootte, mogelijkheden voor gegevensopslag en de aanwezigheid van een intern filter waarmee achteraf via een gravimetrische controle een correctiefactor kan worden berekend. In een vergelijkend veldonderzoek zijn deze vier monitoren toegepast in een werkplaats voor dieselmotoren en een timmerfabriek. Bovendien zijn ter vergelijking gestandaardiseerde gravimetrische metingen uitgevoerd naar de concentraties inhaleerbaar en respirabel stof. Alle metingen zijn simultaan en stationair uitgevoerd. De 5 seconden-gemiddelde resultaten van de Grimm bleken slecht te correleren met die van de andere drie monitoren. De resultaten van de DustTrak en de DataRAM vertoonden de beste overeenstemming. De berekende correctiefactoren waren zeer onbetrouwbaar vanwege de geringe hoeveelheden verzameld stof op de interne filters. Hierdoor werd het onmogelijk kwantitatieve uitspraken te doen over de hoogte van de stofconcentraties zoals gemeten door de monitoren. Met direct uitlezende stofmonitoren kan in korte tijd veel nuttige informatie worden verzameld. Deze informatie kan zinvol worden gebruikt om piekblootstellingen te karakteriseren, bronnen op te sporen en de effectiviteit van beheersmaatregelen te evalueren. Kwantitatieve gegevens over de heersende stofconcentraties zijn in het algemeen onbetrouwbaar. Een uitgebreide ijking en het toepassen van zeer moeilijk te verkrijgen correctiefactoren kan hier enige verbetering in aanbrengen.

Inleiding

Grofweg gezegd zijn er twee manieren om een stofconcentratie in de lucht te bepalen. De meest gebruikte manier is de 'gravimetrische methode'. Met behulp van een pomp wordt een luchtmonster over een filter geleid. Met behulp van het verschil in filtergewicht en het volume doorgezogen lucht kan de stofconcentratie worden berekend. Met deze informatie kan worden volstaan indien alleen wordt gekeken naar tijdgewogen gemiddelden (Vincent, 1995). Meer informatie wordt verkregen met direct uitlezende monsternamen apparatuur. Door de korte middelingstijd is deze goed in staat bronnen van blootstelling op te sporen, effecten van beheersmaatregelen te beoordelen en piekblootstellingen te karakteriseren (Frankhuijzen, 1995; Hering, 1989).

Een veel gebruikte methode om direct aerosolen in de lucht te meten is met behulp van lichtverstrooiing. Bij deze methode wordt invallend monochroom licht weerkaatst door deeltjes die door de meetkamer van het apparaat worden geleid. Een onder een bepaalde hoek gepositioneerde sensor vangt het weerkaatste licht op. Afhankelijk van de precieze hoek van weerkaatsing en de intensiteit van de lichtbundel berekent de aerosol monitor de

Summary

The Grimm, DustTrak, DataRAM and MiniRAM are light-scattering real-time aerosol monitors. These monitors are different with respect to measured particle sizes, the ability to log data and presence of an internal filter which enables calculation of a calibration factor. In a comparative survey these four monitors were used in a workshop for diesel engines and a joinery. In addition, standard gravimetric measurements of inhalable and respirable dust were performed. All measurements were carried out simultaneously and stationary. The 5 seconds time-weighted average concentrations of the Grimm appeared to correlate very badly with the results of the other three monitors. The results of the DustTrak and the DataRAM showed the highest correlations. The calculated correction factors were very unreliable due to insufficient amounts of collected dust on the internal filters. Quantitative estimates of the dust concentrations based on the real-time aerosol monitors were therefore not feasible. Applying real-time aerosol monitors will result in a large number of data within a limited time period. This information can be used to characterize peak exposures, locate sources of dust exposure and to check the effectiveness of control measures. Quantitative exposure concentrations based on results from these monitors are in general unreliable. Only an extensive calibration and the application of correction factors might lead to more reliable quantitative exposure data.

Trefwoorden: stofmetingen, direct uitlezende monitoren, deeltjesgrootte-verdeling.

hoeveelheid deeltjes in de lucht, alsmede hun grootte (massa). Hieruit wordt daarna de concentratie berekend. Een voordeel van deze methode boven bijvoorbeeld elektrische, mechanische, nucleaire of moleculaire methoden is dat de meting op afstand plaats vindt zonder het aerosol te verstoren (Vincent, 1995). Een belangrijk nadeel van deze methode is echter dat het niet eenvoudig is kwantitatieve waarnemingen te doen. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de intensiteit van de lichtverstrooiing beïnvloed wordt door de grootte, kleur, vorm en brekingsindex van het deeltje. Theoretische studies hebben aangetoond dat lichtverstrooiing de grootte van een deeltje kleiner dan 1 µm kan vaststellen met een nauwkeurigheid van ca. 15% (Dellago, 1992). Voor deeltjes tussen 1 µm en 2 µm is dit al afgenomen tot ca. 30%. Uit een andere studie naar het gedrag van direct uitlezende apparaten is gebleken dat de door deze apparaten berekende tijdgewogen gemiddelde (TGG) binnen 25% van de gravimetrisch verkregen stofconcentraties lag (Leck, 1981). Een voorwaarde voor deze toepassing is dat een uitgebreide calibratie voor het te onderzoeken stofftype noodzakelijk is (Woskie, 1993). De Landbouwniversiteit Wageningen is in het bezit van enkele direct uitlezende aerosol monitoren. Er wordt beschikt over een aantal MiniRAM's en een Grimm 1.102 stofmonitor. Vanwege de hoge verwachtingen die gekoppeld waren aan de mogelijkheden van dit laatste appa-

1. Landbouwniversiteit Wageningen, Afdeling Gezondheidsleer, Postbus 238, 6700 AE Wageningen, tel. 0317-484147, fax 0317-485278.

raat, te weten een volledig betrouwbare meetmethode waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen verschillende deeltjesgrootten (Grimm, 1996) en de betrekkelijk geringe hoeveelheid beschikbare informatie is besloten een onderzoek te doen naar de prestaties van de Grimm in de praktijk. Er is een vergelijking gemaakt tussen de resultaten van de Grimm en resultaten van drie soortgelijke direct uitlezende aerosol monitoren: de 'DustTrak', de 'DataRAM' en de 'MiniRAM'. Met de MiniRAM zijn recent andere vergelijkende studies gedaan (Lehocky, 1996; Tsai, 1996). Ter vergelijking zijn meer gestandaardiseerde gravimetrische methoden meegenomen in het meetprogramma.

Beschrijving van de direct uitlezende stofmonitoren

In Tabel 1 worden de belangrijkste kenmerken van de vier direct uitlezende stofmonitoren kort samengevat. Omdat de verschillen tussen de vier stofmonitoren groot zijn, volgt nu eerst een korte beschrijving van de belangrijkste kenmerken van elk apparaat.

Grimm

De Grimm 1.102 meet momentaan de stofconcentratie in de lucht. Het is in staat hierbij onderscheid te maken tussen vijf verschillende fracties, > 1 µm, > 2 µm, > 5 µm, >10µm en totaal. Deze fracties worden op vijf verschillende kanalen opgeslagen. De resultaten worden elke 5 seconden digitaal weergegeven in µg/m³ of in aantallen

deeltjes per liter. Via een RS-232 seriële interface kunnen de gegevens worden doorgestuurd naar een computer. In dat geval worden de individuele 5 seconden gemiddelde waarden bewaard. De minuutsgemiddelde waarden van een meetessie worden bewaard op de bijgeleverde geheugenkaart.

De Grimm werkt als volgt (zie Figuur 1). Een gedefinieerde hoeveelheid lucht met stofdeeltjes wordt via een isokinetische monsternemer (1) of cycloon (9) door middel van een pomp (3) aangezogen en vervolgens door een meetcel (2) en een filter (8) geleid. Een laserdiode (4) brengt via optische filters een lichtbundel door de meetcel. Als een zwevend deeltje de lichtbundel passeert zal het een strooiligteffect veroorzaken dat onder een hoek van 60 tot 120° wordt gemeten met een foto-detector (5). De pulshoogte-analyser (6) rubriceert ieder deeltje naar grootte en geeft deze informatie door aan een microprocessor. Daarna wordt de informatie op het beeldscherm (7) weergegeven, opgeslagen op de geheugenkaart (10) en eventueel doorgegeven naar de RS-232 seriële interface.

Het meetbereik van de Grimm loopt van 0,1 µg/m³ tot 50 mg/m³, het meet hierbij alle deeltjes met een diameter groter dan 0,5 µm. Het debiet is 1,2 L/min (ca.10%). Tijdens het meten voert de Grimm automatisch een nul-puntcheck uit na iedere 50 seconden; deze duurt 10 seconden. Hierdoor is het gemiddelde debiet 1,0 L/min (5/6 x 1,2 L/min). In de fabriek is de Grimm gecalibreerd met behulp van stearine aerosolen. Deze aerosolen hebben een specifieke brekingsindex en gewicht welke niet overeen

Tabel 1. Overzicht van de belangrijkste kenmerken van de vier direct uitlezende stofmonitoren

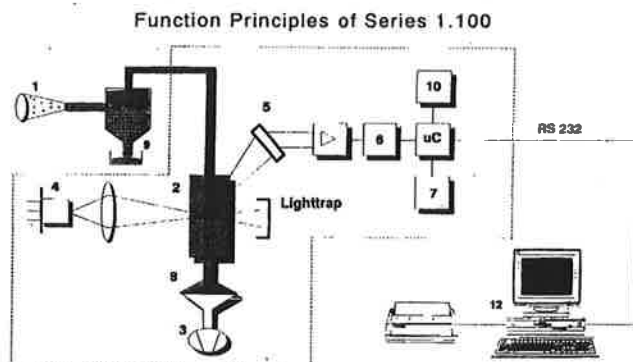
	Grimm 1.102	DustTrak	DataRAM	MiniRAM
Deeltjesgrootte	>0,5 µm, >1 µm >2 µm, >5 µm, >10 µm	0,1-15 µm	0,1-10 µm	0,1-10 µm
Voorafscheider	Respirabel (alleen voor versie 1.103)	Respirabel	PM ₁₀ , PM _{2,5} , Respirabel	Respirabel
Concentratie bereik	0,1 µg/m ³ 50 µg/m ³	1 µg/m ³ 100 mg/m ³	0,1 µg/m ³ 1 mg/m ³ 1-40 mg/m ³ 40-400 mg/m ³ (automatische range keuze)	10 µg/m ³ 10 mg/m ³ 0,1-100 mg/m ³ (automatische range keuze)
Flow	1,2 L/min	1,4-2,4 L/min ¹	1,7-2,3 L/min ¹	Passief
Datalogger	Losse geheugenkaart, eventueel via een PC	Ingebouwd	Ingebouwd	Aparte, datalogger, via kabel verbonden
Log interval ¹	5 sec of 1 min	1 sec-60 min	1 sec-4 uur	1 sec-4 uur
Data points	600 via geheugenkaart, oneindig via PC	30.000	4.500 (elk punt bestaat uit min, max en gem)	14.000
Loopduur batterij	4 uur	16 uur	>20 uur	> 8,5 uur (logger 100 uur)
Lichtbron	Laserdiode	Laserdiode	Infrarood	Infrarood
Hoek sensor	60°-120°	90°	45°-90°	45°-90°
Intern filter	ja	nee	ja	nee
Gewicht	3 kg	1,5 kg	5,3 kg	0,45 kg
Fabrikant	Grimm (D)	TSI (VS)	MIE (VS)	MIE (VS)
Prijs (1996)	versie 1.104 ³ f 15.930 versie 1.105 f 19.895	f 7.000	f 24.500	f 9.000

1. Instelbaar door gebruiker.

2. Elk log interval wordt gemiddelde over laatste 10 waarnemingen berekend en weggeschreven.

3. Inmiddels is de Grimm 1.102 vervangen door de Grimm 1.104, deze meet de concentraties inhaleerbaar, thoracaal en respirabel stof. De Grimm 1.103 is vervangen door de Grimm 1.105 welke naast de inhaleerbare, thoracale en respirabele fractie ook nog de concentraties PM₁₀ en PM_{2,5} meet. Daarnaast kan deze versie zo worden ingesteld dat hij acht verschillende deeltjesgrootten meet, te weten >0,5 µm, >0,75 µm, >1 µm, >2 µm, >5 µm, >7,5 µm en >10 µm.

Figuur 1. Werkingsprincipe van de Grimm



hoeven te komen met stofdeeltjes in de praktijk. Hiervoor kan worden gecorrigeerd met behulp van een gravimetrische controle. Nadat de stofdeeltjes door de meetcel zijn geleid komen ze terecht op een filter dat zich in het apparaat bevindt. Door dit filter voor elke meetsessie te vervangen is het mogelijk na afloop met behulp van een analytische balans de totale stofmassa van de meetsessie te bepalen. Na vergelijking met de door de Grimm berekende stofmassa kan zo een correctiefactor worden bepaald. Deze kan bij de volgende meetsessie worden ingesteld. Tevens is het met deze correctiefactor mogelijk de resultaten van de meetdag achteraf per computer te corrigeren.

DustTrak

Het principe waarop de werking van de DustTrak berust is hetzelfde als van de Grimm. Er is een aantal belangrijke verschillen in de uitvoering. Zo worden de gemeten concentraties opgeslagen door een ingebouwde datalogger. In tegenstelling tot de geheugenkaart van de Grimm kan bij een datalogger het loginterval worden ingesteld. Het loginterval is zowel een maat voor de frequentie als een middelingsduur. Per loginterval wordt de gemiddelde concentratie weggeschreven. Het loginterval is instelbaar tussen 1 seconde en 60 minuten (voor de geheugenkaart van de Grimm is het loginterval dus vast ingesteld op 1 minuut). De datalogger wordt aan het eind van de meting uitgelezen met behulp van een computer die met behulp van een speciale kabel aan de DustTrak wordt gekoppeld. De DustTrak wordt geleverd met een speciaal software programma (Trakpro 1.20, TSI Incorporated) voor het uitlezen en verwerken van de meetgegevens. Hiermee kan ook het loginterval worden ingesteld.

De DustTrak is uitgerust met een luchtgordijn systeem. Dit houdt in dat tijdens de meting een dun laagje schone lucht langs de optisch gevoelige onderdelen wordt geblazen zodat een afscheiding ontstaat met de passerende aerosolen. Dit voorkomt vervuiling van lenzen, sensoren, etc. Gevolg hiervan is dat de DustTrak slechts eenmaal per jaar hoeft te worden gecalibreerd. Hiervoor moet hij naar de fabriek worden gestuurd.

Het meetbereik loopt van $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tot $100 \text{ mg}/\text{m}^3$, hierbij worden alle deeltjes met een diameter tussen de 0,1 en ca. $10 \mu\text{m}$ gemeten. Als accessoire kan een cycloon worden bijgeleverd die de respirabele fractie afscheidt. Hierdoor is het mogelijk de gemeten concentraties te vergelijken met gravimetrisch verkregen respirabel stof concentraties. Vervolgens kan een correctiefactor worden berekend die bij een volgende meting kan worden ingesteld. De flow van de DustTrak is instelbaar tussen 1,4 en $2,4 \text{ L}/\text{min}$. Met behulp van een 'nulfilter' kan worden gekeken of de nulpunt instelling nog goed is; deze kan indien noodzakelijk worden bijgesteld. De hoek waaronder de sensor van de DustTrak is geplaatst bedraagt 90° .

DataRAM

De DataRAM (Data Real-time Aerosol Monitor) werkt op basis van lichtverstrooiing en meet deeltjes met een diameter tussen 0,1 en $10 \mu\text{m}$. Als accessoire is een $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2,5}$ impactor te verkrijgen welke de desbetreffende deeltjes afscheidt. Voor afscheiding van de respirabele fractie is een cycloon verkrijgbaar. Als extra kan ook nog worden beschikt over een verwarmingselement voor het meten onder extreem vochtige of mistige omstandigheden en een monster verdunner voor het meten van zeer hoge concentraties. Het meetbereik loopt zonder deze accessoires van $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tot $400 \text{ mg}/\text{m}^3$. Dit bereik is opgedeeld in drie ranges: $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – $1 \text{ mg}/\text{m}^3$, 1 – $40 \text{ mg}/\text{m}^3$ en 40 – $400 \text{ mg}/\text{m}^3$. Deze worden tijdens de meting automatisch geselecteerd. De flow is digitaal in te stellen tussen $1,7$ en $2,3 \text{ L}/\text{min}$ ($\pm 5\%$).

Net als de DustTrak beschikt de DataRAM over een ingebouwde logger; het loginterval is instelbaar tussen 1 seconde en 4 uur. Er is geen speciale software beschikbaar voor de uitlezing van de gegevens na afloop van de meting. Dit gebeurt daarom onder Windows, met het programma 'Terminal'. Hierbij worden de data in een ASCII file weggeschreven waarna ze via een spreadsheet programma verder kunnen worden verwerkt.

De DataRAM beschikt over nulpuntcheck en een 'span check' functie. Bij de laatste wordt een kunstmatig verkregen uitslag getoetst aan een in de fabriek bepaalde referentiewaarde. Indien het verschil tussen de twee te groot is (meer dan 10%) moet contact worden opgenomen met de fabrikant. De DataRAM zal dan in de meeste gevallen voor een calibratie moeten worden teruggestuurd naar de fabriek. Dit is vrijwel nooit nodig aangezien de DataRAM is uitgerust met een luchtgordijn systeem dat de optisch gevoelige onderdelen schoon houdt. Daarnaast worden deze onderdelen voor aanvang en na afloop van iedere meting schoongebazen met gefilterde lucht (purging).

In tegenstelling tot de Grimm en de DustTrak maakt de DataRAM als lichtbron gebruik van infrarood licht en niet van een laserdiode. De sensor is onder een hoek van 45 – 90° geplaatst (Vincent, 1995).

MiniRAM

De belangrijkste kenmerken van de MiniRAM (Miniature Real-time Aerosol Monitor) zijn de geringe afmetingen ($10 \times 10 \times 4 \text{ cm}$) en het gewicht ($0,45 \text{ kg}$), waardoor hij geschikt is voor persoonlijke monsternamen. Het tweede grote verschil met de voorgaande monitoren is dat de MiniRAM geen actieve lucht aanzuiging heeft. De meetkamer ligt open (eventueel beschermd door een metalen zonnepkap) zodat de met stofdeeltjes gevulde lucht door diffusie en beweging van de monitor de meetkamer binnenvaart. In de meetkamer wordt op basis van lichtverstrooiing de concentratie berekend. De MiniRAM beschikt niet over een luchtgordijn systeem ter bescherming van de optisch gevoelige onderdelen. De uitkomsten van de MiniRAM zijn in de fabriek geijkt met behulp van een gravimetrische standaard waarbij 'Arizona Road Dust' gebruikt is. Calibratie voor een ander type stof is mogelijk (Woskie, 1993). De resultaten zijn het meest betrouwbaar voor deeltjes met een diameter tussen 0,1 en $10 \mu\text{m}$, waarbij het meetbereik loopt van $0,01$ tot $100 \text{ mg}/\text{m}^3$.

De MiniRAM zelf heeft beperkte mogelijkheid voor het opslaan van data. Er is een analoge uitgang om data door te geven aan een datalogger of een schrijver. De datalogger kan binnengekomen spanning omzetten in numerieke waarden voor de gemeten stofconcentratie. Hiertoe moet de datalogger eerst worden geijkt via een computer programma (Metrosoft 3200). Het doel hiervan is een relatie aan te geven tussen de ingekomen spanning en de door de

MiniRAM berekende concentratie. De MiniRAM berekent elke seconde de concentratie en geeft deze door aan de datalogger waar ze per loginterval worden gemiddeld en weggeschreven. Dit loginterval kan van tevoren via de computer worden ingesteld tussen 1 seconde en 4 uur. Na afloop van de meting worden de data via het Metrosoft programma uitgelezen en verder verwerkt. Net als de DataRAM maakt de MiniRAM gebruik van infrarood licht. De sensor is onder een hoek van 45-90° geplaatst.

Methoden

Meetstrategie

Tijdens het vergelijkend onderzoek zijn metingen uitgevoerd in twee praktijksituaties: een werkplaats voor dieselmotoren (1 dag) en een timmerfabriek (4 dagen). Op de eerstgenoemde meetlocatie stond een groot deel van de dag een dieselmotor aan. Gezien eigenschappen van dieseluitlaatgassen werden hier relatief veel kleine deeltjes verwacht (<10 µm). Het houtstof in de timmerfabriek bestaat naar verwachting uit grovere deeltjes. De gemiddelde meetduur lag tussen de zes en zeven uur.

De Grimm is in dit onderzoek continu gekoppeld aan een laptop. Dit is gedaan omdat de interesse uitging naar de 5 seconden-gemiddelde waarden. Op deze computer stond een door de universiteit zelf geschreven software programma voor de aansturing van de Grimm. Met dit programma zijn eveneens de ASCII files met de resultaten aangemaakt. Voor de Grimm is per meetdag een correctiefactor berekend met behulp van het interne filter.

De DustTrak is tijdens de metingen voorzien van een cycloon die de respirabele fractie afscheidt. De flow is hiervoor op 1,7 L/min ingesteld. De resultaten zijn met het bijgeleverde software pakket uitgelezen en omgezet in ASCII files.

De DataRAM is ingesteld op een flow van 2,0 L/min. De data zijn na afloop via het 'Terminal' programma van Windows uitgelezen en weggeschreven in een ASCII file. Na elke meetdag is een correctiefactor berekend met behulp van het interne filter.

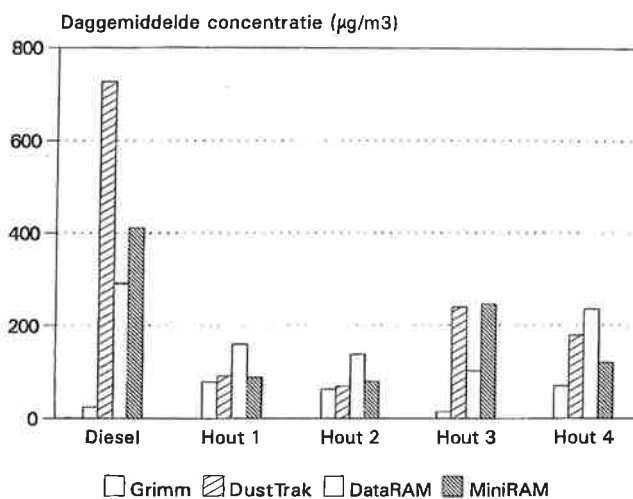
Het nulpunt van de MiniRAM is voor elke meting opnieuw ingesteld. De datalogger is voor elke meting geijkt met behulp van een bijgeleverd software programma (Metrosoft 3200). Hiermee zijn ook de resultaten uitgelezen na afloop van de meting. De bestanden zijn vervolgens omgezet in ASCII files, waarna ze net als alle andere ASCII files verwerkt zijn in Lotus 1,2,3 release 2.4 en SAS 6.04. Aangezien de Grimm een log interval van 5 seconden heeft zijn de andere drie monitoren ook ingesteld op een loginterval van 5 seconden.

Naast meerdere direct uitlezende stofmonitoren zijn enkele gravimetrische methoden gebruikt om stofconcentraties te meten. Voor de bepaling van de concentratie inhaleerbaar stof is gemeten met PAS 6 monsternemers (Ter Kuile, 1986; Kromhout, 1996). De respirabele fractie (D50=5 µm) is bepaald met Casella cyclonen bij een flow van 1,9 L/min (Ogden, 1983). De gravimetrische metingen zijn in parallelle duplo's uitgevoerd; voor verdere analyse zijn deze twee waarden gemiddeld. Tijdens elke meting zijn veldblanco's genomen. Blanco's van de Grimm en de DataRAM zijn op het laboratorium genomen door voorgewogen filters in de sampler te plaatsen zonder daarna de aanzuiging aan te zetten. Na zes uur zijn deze er weer uit gehaald en teruggewogen.

Resultaten

De gemiddelde concentratie inhaleerbaar stof bij 'diesel' en 'hout' bedroeg respectievelijk 0,48 en 0,34 mg/m³, de concentratie respirabel stof was respectievelijk 0,45 mg/m³ en <0,11 mg/m³ (onder detectiegrens). Om de deeltjesgrootteverdeling verder te karakteriseren is de Mean Median Aerodynamic Diameter (MMAD) geschat met behulp van de resultaten van de Grimm. Dit leverde 2,8 µm en 4,7-6,7 µm op voor respectievelijk diesel- en houtstof. Dit alles geeft aan dat het stof in de dieselwerkplaats voornamelijk uit kleine deeltjes bestond.

Figuur 2. Rekenkundig gemiddelde stofconcentratie op vijf meetdagen, zoals bepaald met de ongecorrigeerde resultaten van de vier direct uitlezende stofmonitoren



De MiniRAM gaf regelmatig 'negatieve concentraties'. Hierdoor was het noodzakelijk de meetwaarden na afloop van de metingen te corrigeren. Dit is gedaan door alle waarden boven het nulpunt te brengen. De laagste waarde van de dag is daarbij op nul gesteld. Bij de Grimm en de DataRAM kon een intern filter worden gebruikt om een correctiefactor te berekenen. Voor de DataRAM leverde dit een factor op van 0,64-4,11. Hierbij was een consequente trend te zien tussen de gemiddelde deeltjesgrootte en de correctiefactor: hoe groter de MMAD hoe hoger de correctiefactor. Het interne filter van de Grimm leverde in de meeste gevallen detectieproblemen op. Het verschil in filtergewicht voor en na was ofwel negatief ofwel zo klein dat geen betrouwbare correctiefactor kon worden berekend. De gegevens van de DustTrak zouden in principe gecorrigeerd kunnen worden met behulp van concentraties respirabel stof (Casella). In de meeste gevallen lagen deze echter onder de detectielimiet van 0,11 mg/m³. Hierdoor kon dus ook voor de DustTrak geen dagelijkse correctiefactor worden bepaald. In Figuur 2 wordt een overzicht gegeven van de ongecorrigeerde resultaten van de vier stofmonitoren over de vijf meetdagen. Hierbij valt op dat de Grimm telkens de laagste concentratie oplevert. Het apparaat met de hoogste concentratie wisselt per meetdag, ook binnen dezelfde meetlocatie.

Bij de vergelijking tussen de resultaten van de vier direct uitlezende stofmonitoren is gebruik gemaakt van Spearman's correlatiecoëfficiënt (*R*). Vanwege de onbetrouwbare correctiefactoren was het niet mogelijk regressiecoëfficiënten te berekenen aangezien deze afhankelijk zijn van de absolute hoogte van de concentratie. De gebruikte correlatiecoëfficiënt is gebaseerd op rangorde en wordt hier dus niet door beïnvloed. In Tabel 2 staan de uitkomsten. Opvallend is de lage correlatie tussen de Grimm enerzijds en de andere drie apparaten anderzijds. Indien een vergelijking wordt gemaakt tussen de verschillende subfracties van de Grimm en de andere apparaten verbetert de correlatie niet noemenswaardig. Zo is *R* 0,16 als de fractie 0,5-10 µm van de Grimm vergeleken wordt met de respirabele fractie van de DustTrak. De resultaten van de DustTrak en de DataRAM correleren onderling het beste (*R*=0,80).

Tabel 2. Spearman's correlatiecoëfficiënten tussen de resultaten van de vier direct uitlezende stofmonitoren (gemiddelde en bereik)

	DustTrak	DataRAM	MiniRAM
Grimm	0,14 (-0,61;+0,67)	0,31 (-0,49;+0,78)	0,13 (-0,35;+0,53)
DustTrak		0,80 (+0,72;+0,94)	0,67 (+0,51;+0,86)
DataRAM			0,66 (+0,48;+0,90)

Discussie

Vergelijking van de direct uitlezende stofmonitoren

In deze studie is een praktijkvergelijking gemaakt tussen de prestaties van vier verschillende direct uitlezende stofmonitoren. Wanneer de apparaten worden vergeleken valt op dat de resultaten van de Grimm zeer slecht correleren met die van de andere drie apparaten. Het is niet duidelijk waarom. Wel is te zien dat de grafieken van de stofconcentratie in de tijd welke met de Grimm worden verkregen duidelijk verschillen met die van de DustTrak en DataRAM. Ze zijn grilliger en bevatten meer kleine pieken. De grafieken van de DustTrak en de DataRAM lijken het meest op elkaar, ze zijn veel minder grillig en zeer overzichtelijk. Dit is terug te vinden in de goede correlatie tussen de twee apparaten ($R=0,80$). De grafieken die worden verkregen met de MiniRAM vertonen meer overeenkomsten met die van de Grimm, ze zijn een stuk grilliger dan die van de DustTrak en DataRAM. Ondanks hun grillige verloop correleren ze beter met de DustTrak ($R=0,67$) en DataRAM ($R=0,66$) dan met de Grimm ($R=0,13$).

De correctiefactoren die zijn berekend voor de verschillende stofmonitoren over de verschillende dagen bleken zeer onbetrouwbaar. De voornaamste oorzaak hiervan was de geringe hoeveelheden stof op de filters. Zoals vermeld lag een groot gedeelte van de gemeten respirabel stof concentraties onder de detectielimiet, hierdoor had een vergelijking tussen metingen met de Casella cycloon en de DustTrak weinig zin. Het interne filter van de Grimm leverde zeer onbetrouwbare correctiefactoren op. Dit werd met name veroorzaakt door de erg instabiele blanco's. De gemiddelde blanco was $+0,010$ mg ($n=8$). Hierdoor werd de toch al geringe gewichtstoename van de beladen filters nog kleiner. In twee gevallen kwam daar een negatief gewicht uit voort waardoor geen correctiefactor kon worden berekend. De correctiefactor voor de Grimm is gebaseerd op de hoeveelheid 'totaal' stof dat zich op het filter bevindt. Opmerkelijk is dat deze zelfde correctiefactor daarna eveneens wordt gebruikt om de concentraties van de andere stoffracties ($>1 \mu\text{m}$, $>2 \mu\text{m}$, etc.) te corrigeren. Voor het berekenen van een betrouwbare correctiefactor is volgens de handleiding van de Grimm en DataRAM een gewichtstoename van meer dan 1 mg nodig. Met een meetduur van 6 uur en een flow van 1 L/min betekent dit voor de Grimm een gemiddelde concentratie van $2,78 \text{ mg/m}^3$. De gemiddelde concentratie van de Grimm tijdens dit onderzoek was daarentegen slechts $0,05 \text{ mg/m}^3$. Dit levert na een meetduur van 6 uur en een flow van 1 L/min een totale hoeveelheid stof van $20 \mu\text{g}$ op, 2% van het benodigde. Ter vergelijking; een leeg filter weegt ca. 72 mg. De filters van de DataRAM hadden een gemiddelde gewichtstoename van $248 \mu\text{g}$, ca. 25% van het benodigde.

Evaluatie van het gebruik

Over het gemak in gebruik van de verschillende appara-

ten kan het volgende worden gezegd. De MiniRAM heeft een uitgebreide handleiding zodat het aardig wat tijd kost om alles te begrijpen. Eenmaal bekend met het apparaat en bijgeleverde software (Metrosoft 3200) moet voor elke meting een nulpunt instelling en een ijking van de datalogger worden uitgevoerd. Een ingewikkelde procedure die aardig wat tijd in beslag neemt. Eenmaal klaar voor gebruik is de MiniRAM/Logger combinatie simpel aan en uit te zetten. Groot voordeel zijn de minimale afmetingen van het apparaat waardoor het geschikt is voor persoonlijke monsternamen. Doordat de meetkamer relatief onbeschermd is en er geen luchtgordijn systeem is, treedt snel vervuiling van de lenzen en sensoren op waardoor de nulpunt instelling te hoog komt te liggen. Gevolg is dat de MiniRAM zeer vaak negatieve concentraties geeft.

De DustTrak is een eenvoudig apparaat dat simpel te bedienen is. De flow moet aan het begin van een reeks metingen eenmalig worden aangepast aan de persoonlijke voorkeur van de gebruiker. Als voorbereiding op een meting kan worden volstaan met een nulpunt check. Indien deze niet goed is kan het nulpunt op eenvoudige manier, snel opnieuw worden ingesteld. De DustTrak is te bedienen via een aantal overzichtelijke toetsen. De bijgeleverde software werkt onder Windows en is eenvoudig in het gebruik. Grafieken maken is geen probleem en indien nodig kunnen de data in een ASCII file worden weggeschreven. Opvallend is het handige formaat van de DustTrak.

De DataRAM is simpel te bedienen via een menu dat op een LCD scherm (8 regels x 15 karakters) wordt getoond. Net als de DustTrak vergt hij weinig voorbereidingstijd, met als enige verschil dat hier aan de onderzijde een filter moet worden vervangen voor de gravimetrische controle. De DataRAM heeft als nadeel dat het geen eigen software heeft. De data kunnen worden uitgelezen als ASCII file waarna ze via bestaande programma's verder moeten worden verwerkt. Vanwege de grote hoeveelheid gegevens kunnen daardoor problemen optreden, bijvoorbeeld bij het maken van grafieken. Het tweede nadeel is dat het een groot en zwaar apparaat is.

De Grimm is niet erg ingewikkeld in het gebruik. De voorbereiding bestaat alleen uit het verwisselen van het filter voor de gravimetrische controle. Een nulpuntcheck, instelling van flow en loginterval, etc. zijn niet nodig en/of onmogelijk. Nadat de Grimm handmatig in de 'standby mode' is gezet wordt via het software programma op de laptop het begin en eind van de meting doorgegeven. Door koppeling aan de laptop, welke nodig is indien men de individuele 5 seconden waarden wil bewaren, ontstaan twee problemen. Ten eerste wordt de opstelling zeer groot en fragiel. De laptop moet bijvoorbeeld worden beschermd tegen de stoffige condities. Ten tweede is het door het gebruik van de laptop noodzakelijk een stopcontact in de buurt te hebben aangezien deze niet lang op de accu kan lopen. Alle andere apparatuur kan minstens 4 uur op de accu lopen (zie Tabel 1). De Grimm kan wel zonder laptop worden gebruikt, maar dan kunnen alleen 1 minuuts-gemiddelden worden bewaard op de geheugenkaart. De met de Grimm meegeleverde software (1100.exe - Graphic Software) had een aantal beperkingen, hierdoor is besloten zelf een programma te schrijven. Belangrijkste nadeel van de bijgeleverde software was dat alleen grafieken konden worden gemaakt. De data konden niet worden omgezet in een ASCII file voor verdere verwerking (spreadsheets e.d.). Het nieuwe programma kan dit wel.

Conclusie

Met direct uitlezende stofmonitoren kan op een relatief gemakkelijke manier in korte tijd veel resultaten worden verkregen. Vanwege hun korte middelingstijd geven ze

veel nuttige informatie die met gravimetrische methoden nooit kan worden verkregen. Ze zijn daardoor heel nuttig bij bronopsporing, het beoordelen van effecten van beheersmaatregelen en het karakteriseren van piekblootstelling. Nadeel van deze monitoren is dat geen betrouwbare kwantitatieve waarnemingen kunnen worden gedaan. In theorie wordt dit probleem opgelost door de invoering van een correctiefactor welke wordt verkregen via een gravimetrische controle met behulp van een intern filter. Voor de bepaling van een betrouwbare correctiefactor is echter een zeer hoge stofconcentratie vereist. Een opvallende bevinding ten slotte was dat de resultaten van de Grimm nauwelijks overeenstemming vertoonden met die van de andere drie stofmonitoren.

Ten slotte

De laatste jaren is een groot aantal direct uitlezende stofmonitoren op de markt gekomen. De onderlinge verschillen zijn aanzienlijk. Bij het gebruik van dergelijke apparaten is het daardoor van groot belang dat wordt bedacht welk doel moet worden bereikt en hoe het apparaat daarvoor moet worden ingezet. Tevens is het van belang dat de gebruiker weet waar de beperkingen van het apparaat liggen. Alleen op die manier is het mogelijk om na afloop valide uitspraken te doen over de gevonden resultaten.

Vaschrift

Op deze plaats willen we graag de firma Envicare bedanken voor het ter beschikking stellen van de stofmonitoren. Verder gaat onze dank uit naar Pieter Versloot voor het ontwikkelen van nieuwe software voor de Grimm, en naar de bedrijfsleiding van de twee meetlocaties voor het beschikbaar stellen van meetruimte.

Literatuur

- Boleij, J., Buringh, E., Heederik, D., Kromhout, H., 1995. Occupational hygiene of chemical and biological agents. Elsevier, Amsterdam.
- Dellago, C., Horvath, H., 1993. On the accuracy of the size distribution information obtained from light extinction and scatter-

- ring measurements. I. Basic considerations and models. *J. Aerosol Science* 24: 129-141.
- Esmen, N.A., 1984. On estimation of occupational health risks. N.A. Esmen & M.A. Mehlman (Eds): Occupational and industrial hygiene: concepts and methods. Princeton Scientific Publishers, Princeton. 45-75.
- Frankhuijzen, E.J.K., Hollander, A., Kromhout, H., 1995. De toepasbaarheid van de miniature real-time aerosol monitor (MiniRAM) in arbeidshygiënisch onderzoek. *Tijdschrift voor de toegepaste Arbowedenschap* 8: 64-69.
- Grimm, H.J., 1996. Optical method for monitoring and characterisation of fine particles in workplace and urban environments. *Occupational Hygiene '96. Promoting a healthy working environment.* The British Occupational Hygiene Society, 63.
- Hering, S.V., 1989. Air sampling instruments, 7th edn. American Conference of Governmental Industrial hygienists (ACGIH), Cincinnati, OH.
- Kromhout, H., 1996. Inhaleerbaar-stofmonitoren getest. Resultaten van CEN-studie beschikbaar. *Tijdschrift voor de toegepaste Arbowedenschap* 9: 42-45.
- Kuile, W.M. ter, 1984. Vergleichsmessungen mit verschiedenen geräten zur bestimmung der gesamtstaubkonzentration am arbeitsplatz: Teil II. *Staub-Reinhaltung der Luft* 44: 211-216.
- Leck, M.J., 1981. Optical scattering instantaneous respirable dust indication system. *Aerosols in the mining and industrial work environments* (Eds. V.A. Marple and B.Y.H. Liu). Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, MI, 701-717.
- Lehocky, A.H., Williams, Ph.L., 1996. Comparison of respirable samplers to direct-reading real-time aerosol monitors for measuring coal dust. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 57: 1013-1018.
- Ogden, T.L., Braker, D., Clayton, M.P., 1983. Flow-dependence of the Casella respirable-dust cyclone. *Ann. Occup. Hyg.* 27: 261-271.
- Tsai, C.J., Shih, T.S., Lin, J.D., 1996. Laboratory testing of three direct reading dust monitors. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 57: 557-563.
- Vincent, J.H., 1995. *Aerosol science for industrial hygienists.* Elsevier, Oxford.
- Woskie, S.R., Shen, P., Finkel, M., Eisen, E.A., Smith, Th.J., Wegman, D.H., 1993. Calibration of a continuous-reading aerosol monitor (Miniram) to measure borate dust exposures. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 8: 38-45.