1997:13

Provtagningseffektivitet för den svenska metoden för mätning av totaldamm

Göran Lidén
Lee Kenny
Dave Mark
Colin Chalmers

ARBETE OCH HÄLSA VETENSKAPLIG SKRIFTSERIE
ISBN 91–7045–419–1 ISSN 0346–7821

Arbetslivsinstitutet

Arbetslivsinstitutet

Centrum för arbetslivsforskning

Arbetslivsinstitutet är nationellt centrum för forskning och utveckling inom arbetsmiljö, arbetsliv och arbetsmarknad. Kunskapsuppbyggnad och kunskapsanvändning genom utbildning, information och dokumentation samt internationellt samarbete är andra viktiga uppgifter för institutet.

Kompetens för forskning, utveckling och utbildning finns inom områden som

- arbetsmarknad och arbetsrätt,
- arbetsorganisation, produktionsteknik och psykosocial arbetsmiljö,
- ergonomi,
- arbetsmiljöteknik och belastningsskador,
- arbetsmedicin, allergi, påverkan på nervsystemet,
- kemiska riskfaktorer och toxikologi.

Totalt arbetar omkring 470 personer vid institutet, varav 350 med forskning. Forskning och utbildning sker i samarbete med universitet och högskolor.

ARBETE OCH HÄLSA
Redaktör: Anders Kjellberg
Redaktionskommitté: Anders Colmsjö, Elisabeth Lagerlöf och Ewa Wigaeus Hjelm

© Arbetslivsinstitutet & författarna 1997
Arbetslivsinstitutet,
171 84 Solna, Sverige

ISBN 91–7045–419–1
ISSN 0346-7821
Tryckt hos CM Gruppen

Förord

Yrkesmässig exponering för ”totaldamm” har i Sverige och andra länder mätts sedan sextiotalet. Man har trott att den använda mätmetoden mätte allt luftburet damm, därav begreppet totaldamm. I ett gemensamt europeiskt projekt har för första gången provtagningseffektiviteten för flera länders standardprovtagare för totaldamm bestämts i ett laboratorium. I denna rapport redovisas resultaten för den svenska metoden för att provta totaldammhalter framtagna inom det europeiska projektet, samt resultat av endra experiment med den svenska totaldamm-metoden utförda på liknande sätt vid samma laboratorium.

Detta projekt har (vad avser svenskt deltagande) ekonomiskt stötts av Arbetslivsinstitutet, Rådet för arbetslivsforskning (f. d. Arbetsmiljöfonden projektnr 92-0181), Europeiska Gemenskapens tredje ramprogram, delprogrammet Measurements and Testing (projektnr MAT-C920047) samt brittiska Health and Safety Executive (HSE). Lee Kenny vid HSE var koordinator för det europeiska projektet. Experimenten genomfördes under ledning av Dave Mark, dels vid Warren Spring Laboratory (Stevenage), och efter dess nedläggning vid AEA Technology (Didcot). De experimentella försöksplanerna liksom den statistiska analysen av mätdata har gjorts av Colin Chalmers vid DataStat Consultants (London).

Solna i maj 1997

Staffan Krantz

Innehåll

Inledning 1
Litteraturgenomgång 2
Material och metoder 3
Vindtunnel 3
Docka 4
Aerosolgenerering 4
Mätning av aerosolkoncentrationer 5
Bestämning av på filteren depåonerad massa 6
Bestämning av referenskoncentration 6
Experimentell design 6
Systematiskt fel ralativt provtagningskonventionen för inhalerbart damm 7
Resultat 8
Aluminiumoxidaerosol vid vindstyrka 0,5, 1 och 4 m/s 8
Fluoresceinaerosol vid vindstyrka 0,25 och 0,5 m/s 11
Jämförelse av ledande och isolerande kassetter vid vindstyrka 0,5 m/s 12
Diskussion 13
Systematiskt fel relativt inhalerbart damm 13
Experimentens relevans 14
Slutsatser 15
Sammanfattning 16
Summary 16
Referenser 17

Inledning

För att bestämma arbetares exponering för hälsovådligt damm, vilket ej enbart är skadligt för den del av lungorna där gas-utbytet sker (alveolerna), mäts luftens dammhalt enligt en metod som kallas för totaldamm. Både begreppet och den svenska mätmetoden härstammar från 60-talet. I Sverige mäts totaldammhalter med plastkassetter tillverkade i SAN-plast. Vanligen används 37 mm filter, men även 25 mm används. I Sverige och Finland tas locket av kassetten under provtagningen så att filterytan är öppen mot den omgivande luften ("open-face" på engelska), medan man i USA och t.ex. Norge, Frankrike och Spanien behåller locket på och enbart tar av proppen till insugningsöppningen ("closed-face" på engelska) vilket ökar insugningshastigheten och inte på samma sätt exponerar filterytan under provtagningen. I alla länderna placeras kassetten under provtagningen ungefär på nyckelbenet, så att lutningen mot horisontalplanet blir ~45°. I en del länder inom EG (t.ex. Tyskland, Holland och Danmark) provtas totaldamm med olika provtagare placerade antingen på nyckelbenet eller framme på bröstet, dock har de alla en insugningshastighet lika med 1.25 m/s. I Danmark används kassetten på ett liknande som i Norge, fast med hålet uppborrat så att insugningshastigheten blir 1.25 m/s. I Sverige är kraven på provtagningar av totaldamm inte strikta, utan kan variera stort: luftflöde 2 l/min vid personburen provtagning och 20±5 l/min vid eller stationär provtagning, 25 eller 37 mm kassett, kassett av elektriskt ledande eller isolerande material. Den stora variation i utrustning och handhavande för mätning av totaldamm (både nationellt och internationellt) medför att begreppet inte är väldefinierat, trots att mätmetoden används över hela den industrialiserade världen. Mot denna bakgrund är det inte svårt att förstå att man på 80-talet misslyckades med att införa en internationell standard för hur totaldamm skall definieras och hur det skall provtas.

Sedan slutet av 70-talet har försök utförts i Storbritannien, Tyskland och USA för att försöka bestämma hur stor andel av den omgivande luftens partikelkoncentration som faktiskt andas in av människor (12, 21). Försöken har utförts med skyltdockor som utrustats med in- och utblås som reglerats efter hur människor i olika form av ansträngning vanligen andas. Direkt efter insuget finns ett filter placerat som samlar upp alla insugna partiklar. Dockorna har placerats i vindtunnlar. För olika andningssätt, partikelstorlek, vindstyrka, riktning till vinden, har man bestämt kvoten mellan den partikelkoncentration som andas in och den som finns i den ostörda luften. Man har funnit att det vindriktningsoberoende medelvärdet blir tämligen oberoende både av andningssätt och vindstyrkor understigande 4 m/s. Dessa experiment har legat till grund för en internationell standard som beskriver andelen inandade partiklar som funktion av partikelstorleken (1, 2, 4). Andelen inandade partiklar beskrivs av en matematisk funktion, och kallas för provtagningskonventionen för inhalerbart damm, och är idag svensk standard (3). Ett experiment i en vindtunnel på detta sätt innebär implicit att dammet antages alstrat långt bort från den exponerade arbetaren för att transporteras till denne med de allmänna luftrörelserna. Detta är en ovanlig situation i arbetslivet, där det

snarare är så att de exponerade arbetarna själva arbetar med det som alstrar dammet. Resultat som erhålles i vindtunnlar kan därför inte exakt överföras till yrkeshygieniska exponeringsmätningar, utan ger främst en god, och standardiserbar, illustration av hur exponering uppkommer och hur mätmetoder fungerar.

Den arbetsgrupp inom det europeiska standardiseringsorganet Comité Européen de Normalisation (CEN) som utarbetade standarden om provtagningskonventionen för inhalerbart damm, har även utarbetat en förstandard om hur man skall kunna avgöra att en provtagare för t.ex. inhalerbart damm tillräckligt väl följer provtagningskonventionen (5). Som en del av EGs tredje ramprogram "Measurement and Testing" har ett projekt genomförts som har testat användbarheten av det testprotokoll som föreslås av CENs arbetsgrupp genom att utföra ett test av ett antal dammprovtagare för inhalerbart damm och totaldamm vilka används i flera europeiska länder ("Pilot Study of CEN Protocols for the Performance Testing of Workplace Aerosol Sampling Instruments", MAT1-CT920047). Testet går ut på att bestämma dammprovtagarnas provtagningseffektivitet, vilket definieras som den andel av partikelkoncentrationen i den ostörda luften som provtas. Inom detta projekt har även den svenska metoden för totaldammätningar undersökts. Förutom de mätningar som gjorts inom det europeiska projektet, har även vissa andra frågeställningar undersökts i ett specialprojekt. Den filterkassett som används i Sverige är tillverkad av en elektriskt isolerande plast, vilket inte är att rekommendera eftersom det tillför mätningarna ytterligare en störande komponent. Mätningar har genomförts för att avgöra huruvida man erhåller någon skillnad i testresultat för ledande respektive isolerande kassetter. Dessutom har provtagningseffektiviteten vid en lägre vindhastighet, än som användes vid det EG-projektet, undersökts då den dennas lägsta var högre än de som vanligen förekommer vid inomhusarbetsplatser.

I denna rapport kommer provtagningseffektiviteten för den svenska metoden för totaldammätningar att redovisas som funktion av partikelstorlek, vindstyrka och filterkassettens elektriska egenskaper.

Litteraturgenomgång

Partiklar i en aerosol vars totaldammhalt är betydligt högre än den respirabla dammhalten, är så stora att deras grundläggande partikelegenskap är deras massa, vilket medför både en sedimentationshastighet (på grund av tyngdkraften) och tröghet (dvs. att partiklarna inte exakt följer luftens rörelse). Partiklarnas diffusion är däremot försumbara. Är aerosolens elektriska laddning reducerad till en Boltzmannfördelning och alla ytor är elektriskt ledande och jordade, kan även elektriska krafter försummas. Trots detta kan en dammprovtagare inte under alla yttre omständigheter provta alla i en aerosol förekommande partikelstorlekar med 100% effektivitet. Provtagningseffektiviteten, E, definieras som

$$E = \frac{c_p}{c_\infty} \qquad (1)$$

där c_p är den provtagna koncentrationen och c_∞ är den koncentration som finns i den av provtagaren ostörda luften. E är en funktion av partikelstorlek, lufthastighet i inloppsmunstycket och i den ostörda luften, samt provtagarens storlek och geometri, samt dess riktning till den ostörda luftens riktning och till vertikalen (19).

Provtagningseffektiviteten för den filterkassett som i Sverige används för provtagning av totaldamm har undersökts ett flertal gånger. Oftast har den emellertid inte testats så som den används vid personburen provtagning. Istället har den vanligen testats hängandes fritt, antingen i dammkammare med mycket låga luftrörelsehastigheter eller i vindtunnlar vid olika riktningar gentemot vinden. Fairchild et al. (10) har undersökt den filterkassett som används i Sverige fritt hängandes i en vindtunnel, och Raynor (18) har undersökt en liknande provtagare även den fritt hängandes i en vindtunnel. Wood och Birkett (22), Chung et al. (9) och Mark och Vincent (15) har studerat Gelmans 25 mm filterkassett-provtagare, med kassetten monterad på en docka i en vindtunnel. Enbart Buchan et al (7) har studerat den 37 mm filterkassett som vanligen används i Sverige, monterad på en docka i en vindtunnel, dock enbart med dockan vänd mot en vind på 1 m/s. Fritt hängandes kassetter med normalen till filterytan vågrätt uppvisar en provtagningseffektivitet som ökar med ökande partikelstorlek och vindstyrka. Pekar normalen dock nedåt ändras provtagningseffektivitetens utseende så att den nu minskar med ökande partikelstorlek. Provtagningseffektiviteten för provtagare monterade på en docka minskar med ökande partikelstorlek. Buchan et al. fann att det inte var så stor skillnad huruvida kassettens lock var på eller av, samt att 50% provtagningseffektivitet inträffade för en partikelstorlek på ~20 μm.

Material och metoder

Alla experiment har utförts med filterkassetter monterade på en skyltdocka i en vindtunnel. Den första delen av experimenten utfördes vid Warren Spring Laboratory, Stevenage, Storbritannien, och efter dess nedläggning vid AEA Technology, Didcot, Storbritannien. Personalen har dock huvudsakligen varit densamma vid de bägge laboratorierna.

Vindtunnel

En stor vindtunnel med tvärsnittet 2,5 * 2,5 m och längden 10 m har använts vid försöken. Luften ges önskad turbulensgrad genom att använda flera nät och "honeycombs" av varierande grovlek. Dessutom påverkas turbulensen av block i olika storlek som placeras på golv och i tak. För att fördela den insprutade aerosolen och bryta ner luftströmningen från aerosolgeneratorerna fanns nedströms en rutmönstrad träsektion. Experimenten utfördes vid lufthastigheterna 0,25, 0,5, 1 och 4 m/s. Precisionen i lufthastighetsbestämningen var 2%. Den longitudinella turbulensintensiteten var 5% och dockans tvärsnittsarea utgjorde ~10% vindtunnelns tvärsnittsarea.

Docka

En skyltdocka i full storlek placerad på ett roterande bord användes. Dockan var klädd i bomullsoverall, vilken dammsögs efter varje mätning. Andningen simulerades med 20 andetag om 1 liter per minut. Inandning skedde genom munnen, och utandning genom näsan. Dockan andades emellertid under aerosolprovtagartestet enbart för den första vindstyrkan (1 m/s) eftersom den simulerade andningen tycktes påverka luftflödena kring kroppen på ett annat sätt än människors andning (6). De svaga konvektiva luftströmmar upp längs utsidan och innanför en människas kläder, som alstras av kroppsvärmen, har ej simulerats av dockan. Dockan roterade växelvis 180° med- och moturs, varvid riktningsskiftet skedde då dockans ansikte var riktat från vindriktningen, förutom för den första vindriktningen (1 m/s) då den enbart roterade medurs. Den växelvisa rotationen infördes eftersom data från då dockan roterade enbart medurs pekade på att det var en skillnad i provtagningseffektivitet mellan den filterkassett som satt på den axel som fördes mot vinden, och den som satt på den axel som drogs undan vinden. Denna effekt försvann med växelvis rotation. Rotationshastigheten var ~2 varv i minuten.

På dockan fanns sex platser att placera totaldammkassetterna. Tre på dockans framsida och tre på baksidan, två på vänster sida (~5,5 cm åtskilda) och en på den högra. Alla platserna var vid nyckelbenet, med normalen till filtren pekandes neråt med ~45°.

Aerosolgenerering och testaerosol

Två sorters testaerosoler användes, dels aluminiumoxid som finns kommersiellt tillgänglig som pulver i flera kvaliteter med olika nominella partikelstorlekar i intervallet 7-100 μm (alla med snäva partikelstorleksfördelningar), och natriumfluorescin. Aluminiumoxidpulvret dispergerades med generator bestående av en roterande skiva med ett spår i. Pulvret fick falla ned i spåret, överskottet sopades bort, och det kvarvarande pulvret sögs upp med hjälp av en ejektor. För att sprida aerosolen över vindtunnelns tvärsnittsarea användes nio delsystem på den roterande skivan. Avsikten var att alla kvarvarande partikelagglomerat skulle brytas upp av skjuvkrafterna i ejektorn, men resultaten från de mindre partikelstorlekarna visar att så ej var fallet. Testaerosolen bestående av natriumfluorescin generades med hjälp av en roterande skiv-generator tillverkad av Environmental Research Corporation. Dessa partiklar blir helt sfäriska, vilket ej är fallet med aluminiumoxiden, och har en mycket snäv storleksfördelning, den geometriska standardavvikelsen var mindre än 1,1 för alla experimenten.

Det visade sig svårt att erhålla jämna aerosolkoncentrationer över vindtunnelns tvärsnittsarea, avseende variationer i både rum och i tid. Den relativa standardavvikelsen låg på ~10%. För den lägsta vindhastigheten, 0,25 m/s, misslyckades man med att erhålla en jämn koncentrationsprofil.

Partikelstorleken bestämdes för aluminiumoxiden med hjälp av en Micrometrics Sedigraph, i vilken partiklarna får sedimentera i olika vätskor. Osäkerheten i bestämningen är ~5%. Natriumfluorescinpartiklarnas storlek bestämdes genom att de fick fastna på spindeltråd, varefter deras storlek bestämdes mikro-

skopiskt. Aerodynamisk partikeldiameter erhölls i bägge fallen genom att korrigera för partiklarnas densitet.

För de större partikelstorlekarna är det för närvarande omöjligt att med mätningar verifiera att partiklarnas aerodynamiska storlek överensstämmer med den uppskattade. För de mindre partiklarna testades detta genom att använda en direktvisande kaskadimpaktor (17), samt visuell kontroll genom att låta partiklarna fastna på spindeltrådar med efterföljande mikroskopisk analys. För de minsta aluminiumoxidpartiklarna konstaterades att de luftburna partiklarna var agglomererade, och att den skattade aerodynamiska partikelstorleken därför felaktig. Natriumfluorescinpartiklarna var ej agglomererade.

Mätning av aerosolkoncentrationer

Partikelkoncentrationen i vindtunneln mättes med tio stycken tunn-väggiga skarpeggade provtagare vars luftflöde var inställt så att insugningshastigheten var identisk med lufthastigheten i vindtunneln. Allt damm som deponerat inuti provtagarna tillfördes med hjälp av en plastskrapa filtren innan dessa vägdes. Nio provtagare var placerade i en 3*3-matris, med den tionde över den centrala kolumnen. Experimenten gick så till att tillförseln av testaerosolen varierades tills koncentrationsprofilen över vindtunnelns tvärsnittsarea var acceptabelt jämn. Därefter togs de tre provtagarna vilka var placerade i den centrala kolumnen tunnelns mitt bort, och dockan placerades i dess ställe, varvid det återstod tre provtagare på vardera sidan, och en ovanför huvudet. Efter en eller flera mätningar med dockan togs den bort, och de tre provtagarna i den centrala kolumnen sattes tillbaka på sina platser, och koncentrationen mättes på nytt med alla tio provtagarna. Halten aluminiumoxid i tunneln var ungefär 200-300 mg/m^3, medan den för natriumfluorescinaerosolen var ungefär hälften så hög.

Avsikten var att alla experiment i EG-projektet skulle genomföras med provtagare tillverkade i ledande material för att minimera effekter orsakade av elektriska laddningar på partiklarna i testaerosolen. Tyvärr tillverkas ej 37 mm kassetten i ledande material. För att ändå erhålla så ledande kassett som möjligt målades alla ytor som var vända mot luften med en ledande färg, Elecolit 489. Dock kunde inte ytorna på kassettens två delar vilka den glider mot när den sätts ihop målas, eftersom filtret då inte skulle gått att sätta i kassetten på ett lufttätt sätt. Härigenom förhindrades elektriska laddningar att vandra mellan kassettens två delar.

SKC-pumpar kopplade till batterieliminatorer användes för att suga luft genom filterkassetterna. Totaldammkassetterna användes vid flödet 2.0 l/min. Detta flöde motsvarar en lufthastighet i inloppsarean på ~3 cm/s, vilket i sin tur ungefärligen motsvarar sedimentationshastigheten för en 30 μm partikel. Luftflödena bestämdes med hjälp av en Gilian Gilibrator. För referensprovtagarna användes vakumpumpar, och flödet och provtagen volym mättes med hjälp av massflödesmätare och gasur.

Bestämning av på filtren deponerad massa

Den höga dammhalten i vindtunneln under försöken med aluminiumoxid gjorde det möjligt att erhålla dammängder på 3-5 mg på ~20 minuter. Härigenom kunde vägfelen hållas låga. Filtren förvarades i petri-skålar, och vägdes på en våg, modell Mettler AT201, tillsammans med petriskålens underdel.

Filter med natriumfluorescin tvättades i buffrat avjoniserat vatten, och analyserades med en fluorimeter.

Bestämning av referenskoncentration

Som referenskoncentration för de testade filterkassetterna användes dammhalten i vindtunneln i den punkt där dockan var placerad. Denna kunde emellertid inte mätas direkt utan fick skattas utifrån samband mellan dammhalter uppmätta över hela tvärsnittsarean då dockan ej var placerad i vindtunneln (före och efter respektive mätning med docka), och dammhalter uppmätta bredvid dockan under försökens gång. Då dammhalterna i vindtunneln varken var konstanta i tiden eller över tvärsnittsarean, är dessa skattningar behäftade med fel. Två metoder användes för att skatta provtagningseffektiviteten ur mätdata. Ursprungligen användes AEAs metod vilken varken tar hänsyn till referenskoncentrationernas icke-lineära fördelning över tunnelns tvärsnitt eller till deras osäkerhet. Med AEAs metod skattas referenskoncentrationen baserat på medelvärdet före och efter mätningen av de tre centrala provtagarna och den mittersta provtagaren i både den vänstra och högra kolumnen, korrigerat med kvoten mellan medelvärdet under mätningen av den mittersta provtagaren i både den vänstra och högra kolumnen och motsvarande medelvärde före och efter mätningen. AEAs metod visade sig underskatta koncentrationen i den punkt där dockan (och de testade provtagarna) var placerade med ~8%. För att överkomma dessa brister utvecklades en ny speciell statistisk metod vilken skattar både referenskoncentrationen och osäkerheten i denna skattningen (8). Denna metod antar att alla de uppmätta koncentrationer (dvs. med alla provtagarna före och efter mätningarna med dockan, och med enbart de i den vänstra och högra kolumnen under själva mätningarna) är en summa av effekter från resp. mätning och resp. position och konstant slumpmässigt fel. Med hjälp av denna lineära modell skattas därefter referenskoncentrationen på dockans plats på den höjd som de testade filterkassetterna sitter. För experimenten vid 0.5 och 1 m/s är osäkerheten i referenskoncentrationen ~8%, och för 4 m/s är ~10%, medan den för experimenten vid 0.25 m/s är ~30%.

Experimentell design

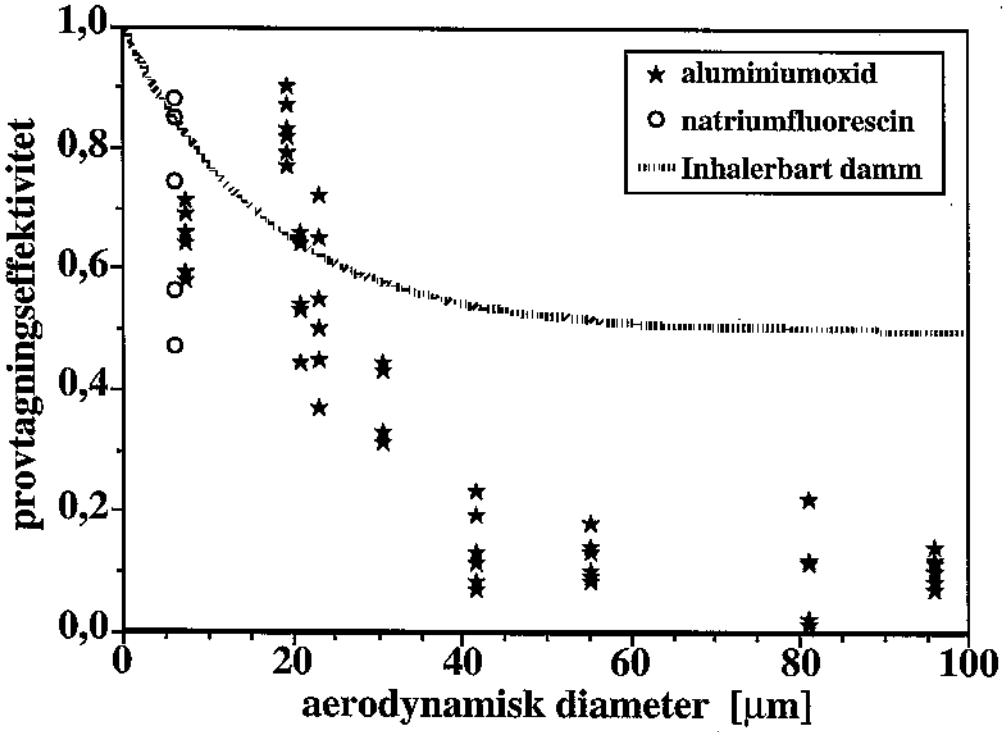
För försöken vid 1, 0,5 och 0,25 m/s användes samma experimentella design. För vindstyrkan 4 m/s användes emellertid en annan design i vilken testen av totaldammprovtagarna ej kan behandlas separat från övriga provtagare som ingick i EG-projektet. I denna design testades två provtagare från tre modeller samtidigt på dockan. Avsikten var att kontrollera den stora dag-till-dag variationen.

Systematiskt fel relativt provtagningskonventionen för inhalerbart damm

För att uppskatta det systematiska felet relativt den internationella provtagningskonventionen för inhalerbart damm har de uppmätta provtagningseffektiviteterna modellerats med enkla funktioner. Andelen provtagen masskoncentration från en aerosol har bestämts för aerosoler med lognormalfördelade partikelstorleksfördelningar. Provtagen andel (PA_{tot}) beräknas med formeln

$$PA_{tot} = C_{tot}/C_o = \int_0^{\infty} eff(d_{ae})\, f(d_{ae} | MMAD, GSD)\, dd_{ae} \qquad (2)$$

där C_{tot} är den provtagna totaldammkoncentrationen, C_o är masskoncentrationen av allt damm suspenderat i luften, d_{ae} är en partikels aerodynamiska diameter, $eff(d_{ae})$ totaldammkassettens provtagningseffektivitet, och $f(d_{ae} | MMAD, GSD)$ fördelningsfunktionen för en aerosol vars storlek är lognormalfördelad med aerodynamiska massmediandiametern MMAD och geometriska standardavvikelsen GSD. PA_{tot} är en funktion av den provtagna aerosolens storleksfördelning (MMAD och GSD). Motsvarande andel för en hypotetisk ideal provtagare som perfekt följer provtagningskonventionen för inhalerbart damm (PA_{inh}). Eftersom provtagningskonventionen för inhalerbart damm ej är definierat för större partikelstorlekar än 100 µm borde den övre gränsen för integralen vara 100 µm. Vid verklig provtagning spelar denna aspekt av definitionen dock ingen roll, utan damm provtas även om partikelstorleken är större än 100 µm. Eftersom många aerosoler i arbetslivet har storleksfördelningar med en icke obetydande andel massa för partiklar större än 100 µm, och provtagningskonventionen för inhaler-



Figur 1. Provtagningseffektivitet för totaldammkassett monterad på skyltdocka i vindtunnel vid vindstyrkan 0,5 m/s, för två olika testaerosoler.

bart damm är konstant (=50%) för partiklar större än 60 µm har den extrapolerats för partikelstorlekar större än 100 µm.

Det systematiska felet, Δ, definieras som

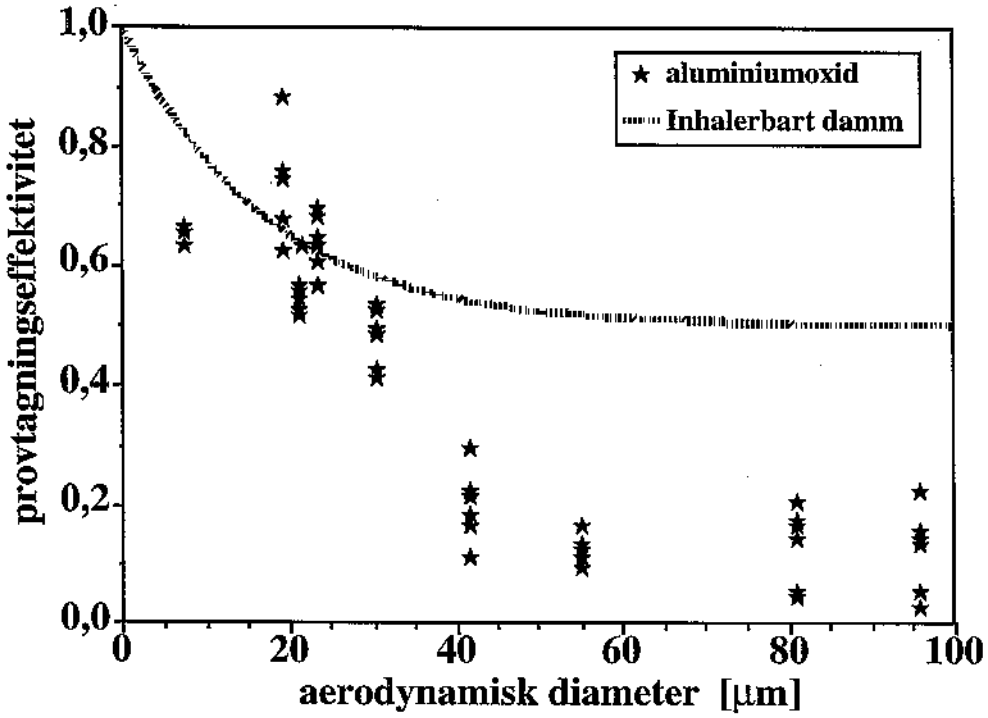
$$\Delta = \Delta(\mathrm{MMAD,GSD}) = \frac{PA_{tot} - PA_{inh}}{PA_{inh}} \qquad (3)$$

och är en funktion av den provtagna aerosolens partikelstorleksfördelning.

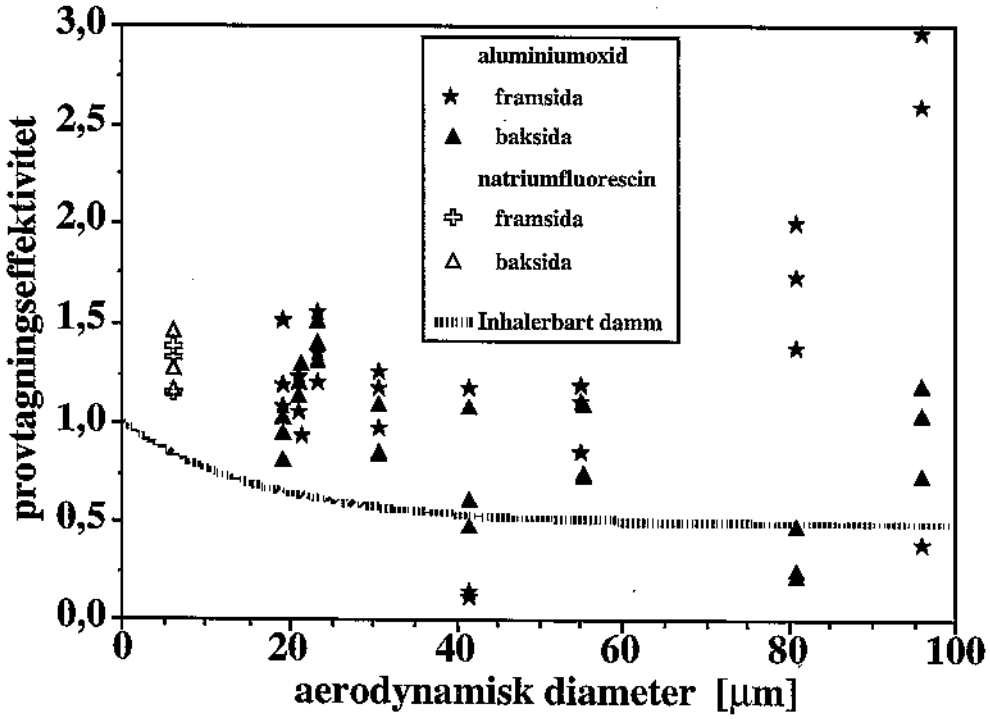
Resultat

Aluminiumoxidaerosol vid vindstyrkorna 0,5, 1 och 4 m/s

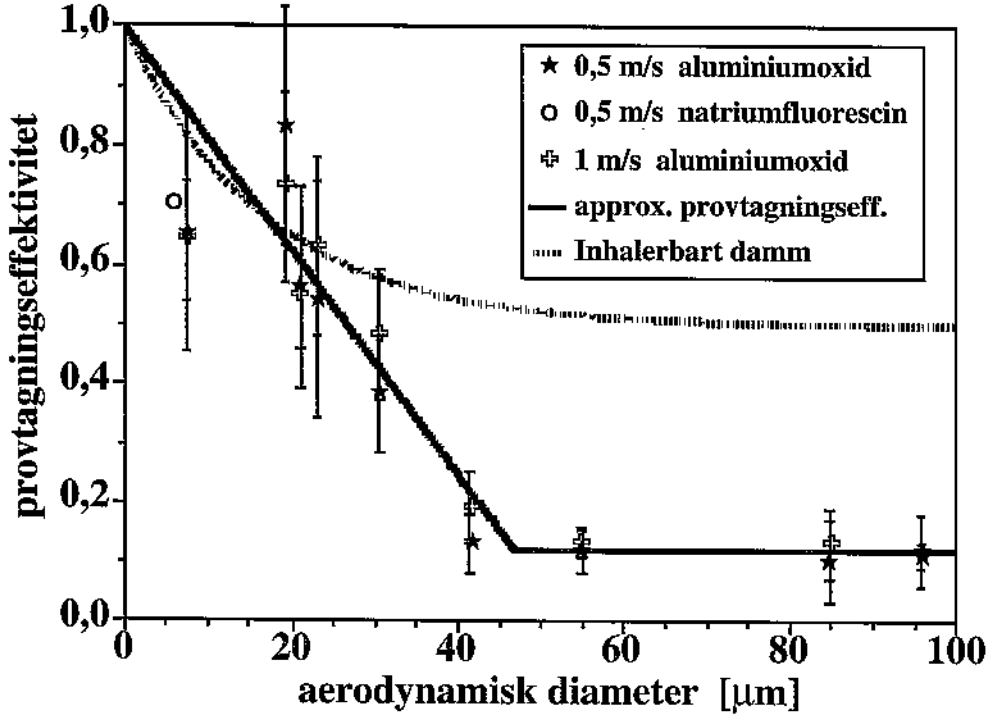
Den uppmätta provtagningseffektiviteten för totaldammkassetten, som funktion av partikelstorlek och vindstyrka visas i figurerna 1-3. Resultaten för de två lägre vindstyrkorna är mycket lika. Provtagningseffektiviteten faller med ökande partikelstorlek upp till ~35 µm, varefter den är konstant. För vindstyrkan 4 m/s är bilden mer splittrad. För partiklar större än ~45 µm finns två uppsättningar effektivitetsvärden, en som är praktiskt taget konstant ~0.5 oberoende av partikelhastigheten, och en som är 1-2.5, ökande med partikelstorleken. Det är de kassetter vilka monterats på dockans framsida som har effektivitetsvärden större än 1.



Figur 2. Provtagningseffektivitet för totaldammkassett monterad på skyltdocka i vindtunnel vid vindstyrkan 1 m/s.



Figur 3. Provtagningseffektivitet för totaldammkassett monterad på skyltdocka i vindtunnel vid vindstyrkan 4 m/s, för två olika testaerosoler. Totaldammkassetter monterade på skyltdockans fram- och baksida redovisas separat.

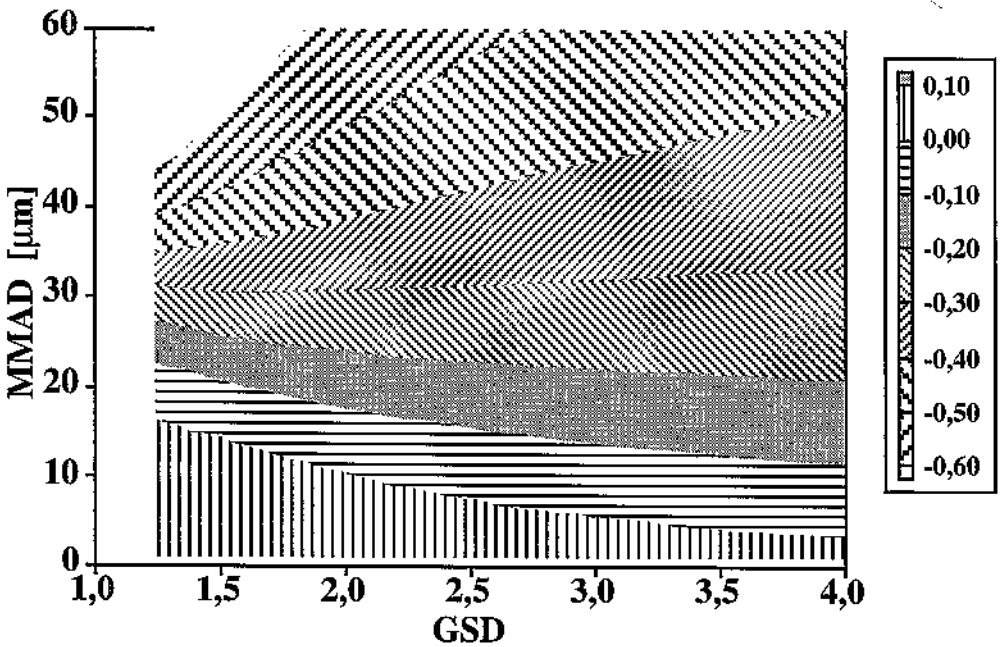


Figur 4. Provtagningseffektivitet (med 95% konfidensintervall) för totaldammkassett monterad på skyltdocka i vindtunnel vid vindstyrkorna 0,5 och 1 m/s för två olika testaerosoler. Approximativ provtagningseffektivtet enligt ekv. 4 och provtagningskonventionen för inhalerbart damm visas som heldragna kurvor.

Då effektivitetsvärdena för vindstyrkorna 0,5 och 1 m/s är praktiskt taget identiska, har en kurva dragits genom dessa värden. Effektivitetsvärdena för aluminiumoxidpartiklar med d_{ae}=7,5 µm har ej medtagits då de implicerar att provtagningseffektiviteten ej skulle gå mot 1 för små d_{ae}. Analysen av den alstrade aerosolen påvisade partikelagglomerat, vilket medförde att provtagningseffektiviteten vid denna partikelstorlek underskattades. Därför bestämdes provtagningseffektiviteten även för natriumfluorescinpartiklar med storleken 6,0 µm. Även dessa för dessa partiklar har man erhållit en lägre provtagningseffektivitet än vad som borde kunna förväntas. I partikelstorleksintervallet 0-100 µm för vindstyrkor ≤1 m/s har provtagningseffektiviteten (eff(d_{ae})) approximerats med följande funktion

$$\mathrm{eff}(d_{ae}) = \begin{cases} 1 - 0{,}5\left(\dfrac{d_{ae}}{d_{ae,50}}\right) & d_{ae} \leq 47{,}0\ \mu\mathrm{m} \\ 0{,}120 & 47{,}0\ \mu\mathrm{m} < d_{ae} \leq 100\ \mu\mathrm{m} \end{cases} \qquad (4)$$

där $d_{ae,50}$ = 26,7 µm och är den partikelstorlek vid vilken provtagningseffektiviteten är 50%. Se figur 4 i vilken även visas uppmätta medelvärden, inkl. 95% konfidensintervall. Inom arbetslivet dominerar vindstyrkor ≤1 m/s vid arbete inomhus, utom vid arbete nära öppna portar vid blåsiga dagar och vid extremt forcerad ventilation. Det systematiska felet, Δ, relativt inhalerbara dammhalter har beräknats med ekvationerna (2-4), och presenteras i figur 5. Då provtagningseffektiviteten för totaldammkassetten är konstant för partikelstorlekar större än 47 µm är det möjligt att även här extrapolera funktionen för partikelstorlekar större än

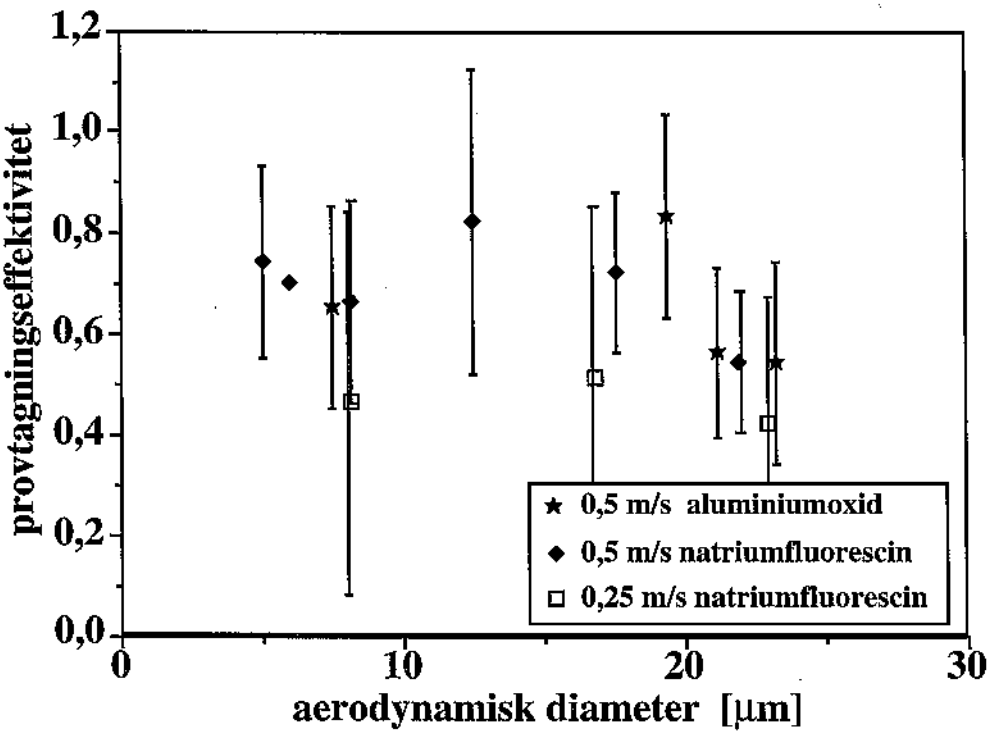


Figur 5. Systematiskt skillnad i provtagen masskoncentration mellan totaldammkassett monterad på skyltdocka i vindtunnel (vid vindstykorna 0,5 och 1 m/s) och provtagningskonventionen för inhalerbart damm (för lognormalfördelade partikelstorleksfördelningar) som funktion av aerodynamisk massmediandiameter (MMAD) och geometrisk standardavvikelse (GSD).

100 µm. För MMAD≤25 µm är Δ litet (≤25%), men för större MMAD ökar Δ och blir för aerosoler med MMAD≈50 µm 40-50%. För aerosoler med MMAD≤25 µm vid låga vindstyrkor fann Kenny (13) att 37mm-kassetten var en acceptabel provtagare för inhalerbart damm (enl. CEN's preliminära klassificeringssystem (5) vilket dock bara tar hänsyn till storleksfördelningar med MMAD≤ 25 µm) ifall dess uppmätta koncentrationer ökades med 15%.

Fluorescinaerosol vid vindstyrkorna 0,25 och 0,5 m/s

De uppmätta medelvärdena, inkl 95% konfidensintervall, och provtagningseffektiviteten enl. ekv. 4 funktion visas i figur 6 och delvis figur 4. De uppmätta värdena visar att samma provtagningseffektivitet erhålles för de två testaerosolerna vid en vindstyrka av 0,5 m/s. Totaldammkassettens provtagningseffektivitet tycks vara lägre vid vindstyrkan 0,25 m/s än vad den är vid 0,5 m/s. Emellertid är mätningarnas osäkerhet så betydande, att konfidensintervallen, vilka liksom medelvärdena har skattats med Chalmers metod (8), blir så stora att det tycks omöjligt att uttala sig huruvida provtagningseffektiviteten är oberoende av vindstyrkan. Dock är alla medelvärden av uppmätta provtagningseffektiviteter vid 0,5 m/s större än de vid 0,25 m/s. Partikelstorlekens inverkan på provtagningseffektiviteten tycks kunna försummas i detta partikelstorleksintervall, dvs. provtagningseffektivitetskurvan tycks vara mycket flack. Under denna förutsättning är det möjligt att göra ett vanligt statistiskt test på differensen mellan provtagningseffektiviteten vid de två vindstyrkorna, där standardavvikelsen vid resp. vindstyrka är lika med den sammanvägda standardavvikelsen för provtagningseffektiviteten vid resp. vind-

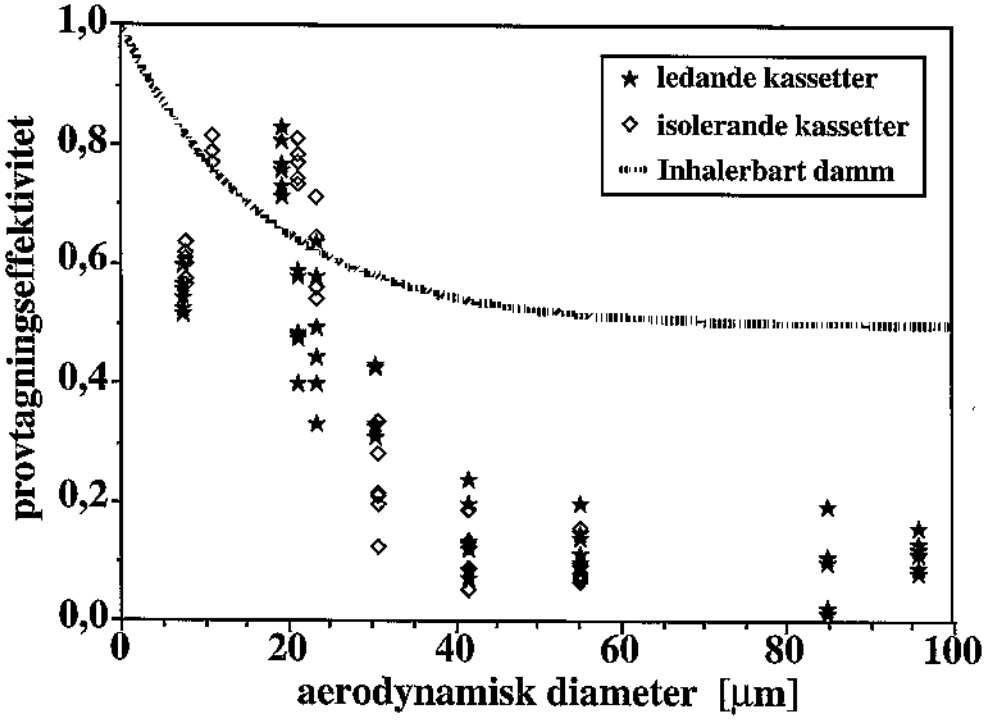


Figur 6. Provtagningseffektivitet (med 95% konfidensintervall) för totaldammkassett monterad på skyltdocka i vindtunnel vid vindstyrkorna 0,25 och 0,5 m/s för två olika testaerosoler.

styrka. Ett sådant test visar att den genomsnittliga differensen i provtagningseffektivitet vid de två vindstyrkorna är ~2.1 ggr större än den skattade standardavvikelsen för differensen. Emellertid är både denna kvots fördelning liksom antalet frihetsgrader okända, men kvotens värde är av samma storlek som normalfördelade resp. Students *t*-fördelade kritiska kvoter (1,96 resp. 2,20 vid 11 frihetsgrader).

Jämförelse av ledande och isolerande kassetter vid vindstyrkan 0,5 m/s

Uppmätt provtagningseffektivitet för elektriskt ledande kassetter (målade med ledande färg), och isolerande kassetter visas i figur 7. För dessa försök har emellertid inte effektivitetsvärdena beräknats med Chalmers metod, utan istället har AEAs metod använts. Resultaten visar att inom experimentets felmarginaler provtar de två kassettmodellerna samma damhalt.



Figur 7. Provtagningseffektivitet för elektriskt ledande och isolerande (målad resp. omålad) totaldammkassett monterad på skyltdocka i vindtunnel vid vindstyrkan 0,5 m/s för testaerosolen bestående av aluminiumoxid.

Diskussion

Systematiska fel relativt inhalerbart damm

Totaldammkassettens systematiska skillnad gentemot provtagningskonventionen för inhalerbart damm börjar vid lägre vindhastigheter (<1 m/s) uppträda vid en partikelstorlek om 20 μm och är fullt utvecklad vid ~50 μm. Vid dessa stora partikelstorlekar provtar totaldammkassetten enbart 24% av vad provtagningskonventionen för inhalerbart damm föreskriver. Se figur 4. Eftersom en aerosols partikelstorleksfördelning spänner över ett brett intervall, blir effekterna på provtagna koncentrationer betydligt lägre, se figur 5. Storleksfördelningar med massmediandiametrar upp mot 50 μm är på inget sätt otroliga i arbetsmiljön. Lidén och Melin (14) har visat att i t.ex. pappersindustrin förekommer bimodala aerosoler vars övre mod har en massmediandiameter på 50-60 μm. De genomförda experimenten visar att totaldammetoden grovt underskattar arbetsluftens koncentrationen av grova partiklar vilka kan deponera i huvudets andningsvägar (och då främst i näsan). Totaldamm-metoden bör följaktligen ej användas vid yrkeshygieniska studier av nässjukdomar eller av ämnen som är systemtoxiska (t. ex. bly).

Experimenten med de bägge filterkassettversionerna, locket av ("open face") resp. locket på och enbart proppen borttagen ("closed face") inom EG-projektet, visade att provtagningseffektiviteten för vindstyrkorna 0,5 och 1 m/s, är mycket lika. Resultaten från dessa vindstyrkor torde därför gå att överföra till totaldammmätningar i Danmark och Norge. (För en fullständig rapport hänvisas till EG-projektets slutrapport (13).) Den i EG-projektet testade provtagaren PAS-6 har samma inloppsöppning som den uppborrade totaldammkassett som används i Danmark. Emellertid har den konisk front, varför dess resultat inte är överförbart på den danska totaldammkassetten.

Vincent (20) har gjort en genomgång av publicerad litteratur om jämförelser mellan totaldammkassetter och IOM-provtagare och funnit att kvoterna brukar ligga mellan 0,25 och 0,5. I en svensk jämförelse av totaldammkassetten och IOM-provtagaren erhölls liknande värden (16). Anledningen till att dessa värden understiger de som framgår av figur 5 kan eventuellt förklaras av att EG-projektet om provtagare för inhalerbart damm fann att IOM-provtagaren (vid vindstyrkan 0,5 m/s) överskattade den inhalerbara dammkoncentrationen för stora partikelstorlekar.

För närvarande pågår ett fältprojekt där dammkoncentrationerna i andningszonen parallellmäts personburet på olika arbetsplatser med både en 37 mm filterkassett och en IOM-provtagare för inhalerbart damm, samtidigt som partikelstorleksfördelningen mäts med en personburen kaskadimpaktor. Avsikten med projektet är att avgöra huruvida de funna skillnaderna mellan koncentrationerna totaldamm och inhalerbart damm kan förklaras utifrån de i EG-projektet uppmätta provtagningseffektiviteterna för resp. provtagare och dammets storleksfördelning i andningszonen. Detta pågående projekt (liksom det som här rapporteras) kommer att utgöra en del av underlaget inför ett beslut om övergång till mätning av inha-

lerbart damm, vilket kan förväntas tas i samband med 1999 års hygieniska gränsvärdeslista.

Experimentens relevans

Vindtunnelexperimenten visar att osäkerheten för närvarande är för stor för att erhålla provtagningseffektivitetskurvor av hög klass, så som exempelvis erhålles vid experiment med cykloner i dammkammare (11). Anledningen till detta är dels svårigheterna att erhålla en stabil lufthastighets- och koncentrationsprofil över vindtunnelns tvärsnitt, dels problemen med att mäta referenskoncentrationerna på ett korrekt sätt. Problemen med hastighets- och koncentrationsprofilerna ledde till att man enbart kunde säga att det var möjligt att totaldammkassettens provtagningseffektivitet påverkas av vindstyrkan i intervallet 0,25 – 0,5 m/s, men att detta inte gick att påvisa detta. Det är därför möjligt att filterkassettens provtagningseffektivitet vid inomhusarbete (och därmed låga vindhastigheter) är än lägre än vad som uppmätts för vindstyrkorna 0,5-1 m/s.

De uppmätta provtagningseffektiviteterna i vindstyrkorna 0,5 och 1 m/s för partiklar mindre än 10 μm ligger i intervallet 0,6–0,8. Detta är betydligt lägre än vad som kan förväntas ifall provtagningseffektiviteten är en kontinuerlig och monoton funktion utan platåer utom för mycket stora partikelstorlekar. Dessa värden ligger i figur 4 betydligt under den inritade approximativa provtagningseffektiviteten, och förbigicks då denna bestämdes. Även resultaten för 0,25 m/s (figur 6) pekar i samma riktning. Buchan et al. (7) fann emellertid att provtagningseffektiviteten för filterkassetten för partikelstorlekarna 2,4 och 9 μm var 0,97 resp. 0.94. Till skillnad från denna undersöknings resultat, är detta vad som kan förväntas av en provtagare. Huruvida de i denna undersökning erhållna värdena orsakats av mätfel vilka beror på den experimentella metoden får avgöras av framtida experiment.

Försöken med ledande och isolerande (målade och omålade) totaldammkassetter visar att även om testaerosolens elektriska laddningsfördelning ej var reducerad till Boltzmanns jämviktsfördelning, spelade de ingen roll för experimentet. Denna slutsats är dock inte helt invändningsfri eftersom inte totaldammkassettens alla ytor på vilka damm kunde deponera var i elektrisk kontakt med varandra.

En närmare undersökning av de figur 3 påvisade skillnaderna mellan provtagare monterade på dockans fram- och baksida visar att de (inom EG-projektet) testade provtagarna vilka monteras på nyckelbenet så att de pekar snett nedåt (dvs. även 37 mm filterkassett med "locket på" och PAS-6) alla har en högre provtagningseffektivitet på dockans "framsida", medan de provtagare som monteras på bröstet riktade horisontellt utåt (IOM, 7-håls, GSP och PerSpec) har en lägre provtagningseffektivitet på dockans framsida (13). Det är troligt att de funna skillnaderna mellan provtagare på dockans fram- och baksida till stor del är en effekt av experimentuppkopplingen och främst beror på hur dockans rotation ändrades från med- till moturs. En konsekvens härav är att vid höga vindstyrkor (≤4 m/s) tycks totaldammkassettens provtagningseffektivitet främst vara en funktion av vinkeln mot vinden, varför kassetten ej bör användas vid så höga vindhastigheter.

Slutsatser

Den dammkoncentration som provtas med totaldammkassetter är inte en skattning av den totala dammkoncentrationen, om man med detta avser att allt luftburet damm skall provtas med 100% effektivitet. Istället har en totaldammkassetten (vid vindstyrkor mellan 0,5 och 1 m/s) en med partikelstorleken minskande provtagningseffektivitet. Den är 50% för 27 μm-partiklar, vilket inte kan anses vara en extremt stor partikelstorlek på dammiga arbetsplatser. För partikelstorlekar över 47 μm är provtagningseffektiviteten oberoende av partikelstorleken, och lika med 12%.

Totaldammkassetten skulle (efter en korrektion på +15%) i låga vindstyrkor (≤1 m/s) kunna fungera som provtagare av inhalerbart damm för aerosoler med massmediandiametrar ≤25 μm. Mätningar i olika arbetsmiljöer indikerar dock att grövre storleksfördelningar är vanliga.

Den låga provtagningseffektiviteten medför att totaldammkassetten ej bör användas vid provtagning av aerosoler vilka är systemtoxiska eller skadliga för huvudets andningsvägar (fr. a. näsan). Ej heller bör den användas för vindstyrkor större än eller lika med 4 m/s.

Det är möjligt att totaldammkassettens provtagningseffektivitet är än lägre vid en vindhastighet av 0,25 m/s än vid lite högre vindhastigheter (0,5-1 m/s). Eventuella laddningar på testaerosolen, liksom val av testaerosol, har ej påverkat experimentens utfall.

Sammanfattning

Lidén G, Kenny L, Mark D, Chalmers C. Provtagningseffektivitet för den svenska metoden för mätning av totaldamm. *Arbete och Hälsa* 1997:13 1-17

Den filterkassett som i Sverige används för provtagning av totaldamm har testats i en vindtunnel, monterad en provdocka. Experimenten visar att totaldammkassetten ej provtar allt luftburet damm. Totaldammkassettens provtagningseffektivitet följer inte ens provtagningskonventionen för inhalerbart damm. Totaldammkassetten har (vid vindstyrkor 0,5-1 m/s) en med partikelstorleken minskande provtagningseffektivitet (50% effektivitet vid 27 μm), för att bli konstant lika med 12% för partikelstorlekar större än 47 μm. Totaldammkassettens låga effektivitet för stora partiklar medför att den ej bör användas vid provtagning av aerosoler vilka är systemtoxiska eller skadliga för huvudets andningsvägar.

Nyckelord: Aerosol, Damm, Filterkassett, Inhalerbart damm, Provtagning, Totaldamm

Summary

Lidén G, Kenny L, Mark D, Chalmers C. Sampling Efficiency of the Swedish Method for the Sampling of Total Dust. *Arbete och Hälsa* 1997:13 1-17

The open-face 37 mm filter cassette used in Sweden as a sampler for total dust has been tested in a wind-tunnel, with cassettes mounted on a mannequin. The experiments show that the total dust sampler does not sample all airborne particles. Neither follows the sampling efficiency of the filter cassette the sampling convention for inhalable dust. The filter cassette has (for wind speeds in the range 0.5-1 m/s) a sampling efficiency which decreases with increasing particle size (with 50% sampling efficiency occurring at 27 μm). For particle sizes larger than 47 μm the sampling efficiency has a constant value, equal to 12%. The low sampling efficiency of the total dust sampler entails that it should not be used for the sampling of generally toxic substances, or aerosols deleterious to the head airways.

Key words: Aerosol, Dust, Filter cassette, Inhalable dust, Sampling, Total dust

Referenser

1. *1992-1993 Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices*. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1992
2. *EN481 Workplace Atmospheres - Size Fraction Definitions for Measurement of Airborne Particles*. Comité Européen de Normalisation, 1993
3. *SS-EN481 Arbetsplatsluft-Partikelstorleksfraktioner för mätning av luftburna partiklar*. Standardiseringen i Sverige, 1994
4. *ISO7708 Air Quality - Particle Size Fraction Definitions for Health-Related Sampling*. International Organisation for Standardisation, 1995
5. *TC137/WG3/N142 Workplace Atmospheres – Assessment of Performance of Instruments for Measurement of Airborne Particles*. Comité Européen de Normalisation, 1995
6. Bradley DR, Johnson AE, Kenny LC, Lyons CP, Mark D, Upton SL. The Use of a Mannikin for Testing Personal Aerosol Samplers. *J Aerosol Sci* 1994(S1);25:155-156.
7. Buchan RM, Soderholm SC, Tillery MI. Aerosol Sampling Efficiency of 37mm Filter Cassettes. *Am Ind Hyg Assoc J* 1986;47:825-831.
8. Chalmers C. *Calculating Efficiencies*. DataStat Consultants, 1995
9. Chung KYK, Ogden TL, Vaughn NP. Wind Effects on Persoanl Dust Samplers. *J Aerosol Sci* 1987;18:159-174.
10. Fairchild CI, Tillery MI, Smith JP, Valdez FO. *Collection Efficiency of Field Sampling Cassettes*. Los Alamos Scientific Laboratory, 1980 (Report LA-8640-MS).
11. Gudmundsson A. *Studies on Particle Size-Selective Sampling of Aerosols Relevant for Deposition in the Human Airways and onto the Eyes* [Doktorsavhandling]. Lunds tekniska högskola, 1995.
12. Hinds WC, Kuo T-L. A Low Velocity Wind Tunnel to Evaluate Inhalability and Sampler Performance for Large Dust Particles. *Appl Occup Environ Hyg* 1995;10:549-555.
13. Kenny LC. *Pilot Study of CEN Protocols for the Performance Testing of Workplace Aerosol Sampling Instruments*. Health and Safety Laboratory, 1995 (Report No. IR/L/DS/95/18).
14. Lidén G, Melin B. Comparison of Sampling Efficiencies in Paper Dust for the Open-Face 37 mm Cassette and the IOM-Sampler. *Second International Symposium on Modern Principles of Air Monitoring*. Sälen, Sweden: , 1996.
15. Mark D, Vincent JH. A New Personal Sampler for Airborne Total Dust in Workplaces. *Ann occup Hyg* 1986;30:89-102.
16. Melin B, Lidén G. *Mätningar 1993-1994 av expositionen för organiskt damm*. Arbetarskyddsstyrelsen, 1995 (Rapport No. 1995:3).
17. Melin B, Lidén G. *Mätning av exposition för pappersdamm*. Arbetarskyddsstyrelsen, 1996 (Rapport No. 1996:2).
18. Raynor GS. Variation in Entrance Efficiency of a Filter Sampler with Air Speed, Flow Rate, Angle and Particle Size. *Am Ind Hyg Assoc J* 1970;31:294-304.
19. Vincent JH. *Aerosol Sampling*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1989.
20. Vincent JH. Progress towards Implementation of New Aerosol Industrial Hygiene Standards, with Special Reference to the Aluminium Industry. *Sci Total Environ* 1995;163:3-9.
21. Vincent JH, Mark D, Miller BG, Armbruster L, Ogden TL. Aerosol Inhalability at Higher Wind Speeds. *J Aerosol Sci* 1990;21:577-586.
22. Wood JD, Birkett JL. External Airflow Effects on Personal Sampling. *Ann occup Hyg* 1979;22:299-310.

Figurtexter

Figur 1. Provtagningseffektivitet för totaldammkassett monterad på skyltdocka i vindtunnel vid vindstyrkan 0,5 m/s, för två olika testaerosoler.

Figur 2. Provtagningseffektivitet för totaldammkassett monterad på skyltdocka i vindtunnel vid vindstyrkan 1 m/s.

Figur 3. Provtagningseffektivitet för totaldammkassett monterad på skyltdocka i vindtunnel vid vindstyrkan 4 m/s, för två olika testaerosoler. Totaldammkassetter monterade på skyltdockans fram- och baksida redovisas separat.

Figur 4. Provtagningseffektivitet (med 95% konfidensintervall) för totaldammkassett monterad på skyltdocka i vindtunnel vid vindstyrkorna 0,5 och 1 m/s för två olika testaerosoler. Approximativ provtagningseffektivtet enligt ekv. 4 och provtagningskonventionen för inhalerbart damm visas som heldragna kurvor.

Figur 5. Systematiskt skillnad i provtagen masskoncentration mellan totaldammkassett monterad på skyltdocka i vindtunnel (vid vindstykorna 0,5 och 1 m/s) och provtagningskonventionen för inhalerbart damm (för lognormalfördelade partikelstorleksfördelningar) som funktion av aerodynamisk massmediandiameter (MMAD) och geometrisk standardavvikelse (GSD).

Figur 6. Provtagningseffektivitet (med 95% konfidensintervall) för totaldammkassett monterad på skyltdocka i vindtunnel vid vindstyrkorna 0,25 och 0,5 m/s för två olika testaerosoler.

Figur 7. Provtagningseffektivitet för elektriskt ledande och isolerande (målad resp. omålad) totaldammkassett monterad på skyltdocka i vindtunnel vid vindstyrkan 0,5 m/s för testaerosolen bestående av aluminiumoxid.