TOTALFÖRSVARETS
FORSKNINGSINSTITUT

FOI-R--1288--SE
Juni 2004
ISSN 1650-1942

Metodrapport

Christer Johansson

Representativ provtagning av aerosol

NBC-skydd
901 82 Umeå

TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

NBC-skydd
901 82 Umeå

FOI-R--1288--SE

Juni 2004

ISSN 1650-1942

Metodrapport

Christer Johansson

Representativ provtagning av aerosol

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI NBC-skydd 901 82 Umeå	**Rapportnummer, ISRN** FOI-R----SE	**Klassificering** Metodrapport
	Forskningsområde 3. Skydd mot NBC och andra farliga ämnen	
	Månad, år Juni 2004	**Projektnummer** A4241
	Verksamhetsgren	
	Delområde 32 B- och C-forskning	
Författare/redaktör Christer Johansson	**Projektledare** Göran Olofsson	
	Godkänd av Åke Sellström	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsdepartementet	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Ingrid Fängmark, Stellan Winter	

Rapportens titel

Representativ provtagning av aerosol

Sammanfattning (högst 200 ord)

För att kunna provta en aerosol representativt, utan förvrängning av partikelstorleksfördelningen, krävs det att mätprober dimensioneras och används korrekt.
Vid val av mätprob och inriktning av denna krävs det att partiklarnas gränsfallhastighet är känd. Med hjälp av denna kan det avgöras om kriterier för stillastående aerosol är tillämpliga samt hur proben skall designas för de enskilda mätsituationerna.
För provtagning av aerosol i rörelse krävs det en korrekt designad isokinetisk prob. Den säkerställer att samma flödeshastighet uppnås i proben som i omgivningen. Proben skall vara riktad rakt mot flödesriktningen.
För provtagning ur stillastående aerosol används en prob som säkerställer att partiklar upp till den storlek som proben designats för inte undgår att sugas in på grund av sin tröghet samt att mätresultatet inte förvrängs på grund av partiklarnas fallhastighet. Proben bör vara horisontellt riktad men även andra inriktningar kan brukas om proben är designad för detta.
Probernas design är beroende av mätinstrumentets flöde, aerosolpartiklarnas densitet och storlek, aerosolgasfasens viskositet och densitet samt i vissa fall även tvärsnittsarean på kanalen som aerosolen rör sig i. Exempel ges på hur prober kan beräknas.

Nyckelord

Aerosol, mätprob, isokinetisk, aerosolprovtagning

Övriga bibliografiska uppgifter	**Språk** Svenska
ISSN 1650-1942	**Antal sidor:** 27 s.
Distribution enligt missiv	**Pris: Enligt prislista**

Issuing organization	Report number, ISRN	Report type
FOI – Swedish Defence Research Agency NBC Defence SE-901 82 Umeå	FOI-R----SE	Methodology report
	Programme Areas 3. NBC Defence and other hazardous substances	
	Month year June 2004	**Project no.** A4241
	General Research Areas	
	Subcategories 32 Biological and Chemical Defence Research	
Author/s (editor/s) Christer Johansson	**Project manager** Göran Olofsson	
	Approved by Åke Sellström	
	Sponsoring agency Department of Defence	
	Scientifically and technically responsible Ingrid Fängmark, Stellan Winter	
Report title (In translation) Representative sampling of aerosol		

Abstract (not more than 200 words)

In order to obtain representative samples of aerosol, without deviations in particle size distribution, properly designed and positioned measurement probes are required.
The particle settling velocity has to be known for proper selection of probes and probe positioning. Using the settling velocity, it can be determined whether or nor the criteria for stationary aerosol are applicable as well as the ideal probe design for each individual sampling situation.
In order to obtain representative samples of non-stationary aerosol a properly designed and positioned isokinetic probes are required. The isokinetic probes assure that the same flow velocity is obtained in the probe as in the surrounding environment. Isokinetic probes must be positioned head on against the flow direction.
In sampling of stationary aerosol the probes has to be designed so as to avoid deviations in the sampled particle size distribution due to particle inertia and settling velocity. Probes designed for stationary conditions are preferably positioned horizontally but other inclinations are possible if the probes' design permits it.
Probe design is dependent on the sample flow of the instrument it is connected to, the density and size of the aerosol particles, the density and viscosity of the gas phase of the aerosol and, in certain cases, the cross-section area of the duct the aerosol is moving through.

Keywords
Aerosol, probe, isokinetic, aerosol sampling

Further bibliographic information	**Language** Swedish
ISSN 1650-1942	**Pages** 27 p.
	Price acc. to pricelist

Innehåll

Innehåll 4
1. Inledning 5
2. Beräkning av partiklars fallhastighet 5
2.1 Beräkning av Reynolds tal (*Re*) 5
2.2 Beräkning av gränsfallhastigheten V_{TS} när *Re* < 1,0 6
2.3 Beräkning av V_{TS} när 1.0 < *Re* < 1000 7
2.4 Beräkning av V_{TS} när 1000 < *Re* < 20000 7
2.5 Beräkning av relaxationstiden τ 8
3. Representativ provtagning när aerosolen är i rörelse 8
3.1 Isokintetisk provtagning..8
3.2 Mätfel resulterande från felaktig mätteknik 10
3.3 Mätteknik när aerosolen ändrar riktning under provtagningen...............12
4. Representativ provtagning när aerosolen är stilla 12
5. Transportförluster 14
6. Lathund för val av mätprob..15
7. Referenser 16
7. Referenser 17
8. Appendix..18
8.1 Lista över symboler, konstanter, definitioner, ekvationer och samband 18
8.2 Lösta exempel 20

1. Inledning

Behov av korrekt karakterisering av partikelstorleksfördelningar i aerosol finns inom ett flertal branscher som t.ex. miljöövervakning, arbetarskydd, fordonsindustri, jordbruk, kemisk industri, halvledartillverkning, nanoteknik samt skyddsforskning om radiologiska, nukleära, kemiska och biologiska vapen.

Vid användning av partikelräknare eller andra instrument för karakterisering av partikelstorleksfördelningen i en aerosol finns vissa faktorer att ta hänsyn till för att undvika förvrängningar i mätresultaten. Mätprobens utförande och inriktning måste vara anpassade till mätinstrumentet, partiklarna som skall provtas samt omgivningen. Olika krav på mätproben gäller för provtagning ur stillastående aerosol respektive aerosol i rörelse.

För att kunna välja rätt mätprob och mätteknik måste hänsyn tas till om partiklarnas rörelse är inom Stokes område, Newtons område eller gränslandet mellan dessa. Beräkningarna för partiklarnas fallhastighet skiljer sig beroende på inom vilket område partiklarna rör sig.

Korrekt beräkning av partiklarnas fallhastighet är viktig för att kunna avgöra om kriterier för stillastående aerosol är tillämpbara, för korrekt dimensionering av mätprober för stillastående aerosol samt för att kunna beräkna hur stort mätfelet blir vid felaktig inriktning av isokinetiska prober.

2. Beräkning av partiklars fallhastighet

Det finns fyra fall att ta hänsyn till när fallhastigheten skall beräknas för en partikel med diametern d_p vars rörelse karakteriseras av Reynolds talet Re:

1. $d_p < 1$ µm	Stokes område, se avsnitt 2.2
2. $d_p > 1$ µm och $Re < 1.0$	Stokes område, se avsnitt 2.2
3. $d_p > 1$ µm och $Re > 1.0$	Övergångsområdet, se avsnitt 2.3
4. $1000 < Re < 20000$	Newtons område, se avsnitt 2.4

2.1 Beräkning av Reynolds tal (*Re*)

Reynolds tal är ett dimensionslöst tal som uttrycker förhållandet mellan tröghetskrafter och viskösa krafter. Detta förhållande avgör vilken ekvation för flödesmotståndet och därmed partikelrörelsen som är tillämplig i olika sittuationer.

$$\mathrm{Re} \approx \frac{Tröghetskrafter}{Viskösa\_krafter}$$ (Tritton, s.97)

Reynolds tal används också för att karakterisera strömningsrörelser som laminära eller turbulenta. Allmänt gäller att strömning i rör är turbulent vid $Re > 4000$ och laminärt vid $Re < 2000$. För strömning kring en partikel gäller laminära förhållanden vid $Re < 1$ och turbulenta vid $Re > 1$ (Hinds, s.29).

Reynolds tal kan uttryckas som:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V d}{\eta} \quad \text{(dimensionslös)} \tag{2.1}$$

Där:

ρ = densitet hos gasfaskomponenten av aerosolen (dvs. aerosolgasen) (kg/m^3)
V = Strömningshastighet relativt ett objekt (t.ex. ett rör eller en partikel) (m/s)
d = diameter på t.ex. en partikel eller ett rör, beroende på vad Re skall beräknas för. Om Re beräknas för ett flöde i ett rör skall d vara rörets diameter. Om Re beräknas för en partikel skall d vara partikelns diameter. (m)
η = dynamisk viskositet hos aerosolgasen, vanligtvis luft (Ns/m^2)

Om *Re* skall beräknas för en partikel skall V vara partikelns hastighet relativt fluiden, dvs. aerosolgasen.

2.2 Beräkning av gränsfallhastigheten V_{TS} när *Re* < 1,0

$$V_{TS} = \frac{\rho_p d_p^2 g C_c}{18\eta} \qquad \text{för } Re < 1{,}0 \tag{2.2}$$

Där:

V_{TS} =gränsfallhastigheten för partikel (terminal settling velocity) (m/s)
d_p = diameter hos partikel (m)
ρ_p = partiklarnas densitet (kg/m^3)

Ekvation 2.2 gäller för alla partikelstorlekar så länge som *Re* < 1,0 och C_c ges av ekvation 2.3.

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p}\left[2.34 + 1.05 e^{-0{,}39\frac{d_p}{\lambda}}\right] \qquad \text{(dimensionslös)} \tag{2.3}$$

Där:

λ= friamedelväglängden för aerosolgasen, vanligtvis luft, beräknas med ekvation 2.4 (m).

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} n \pi d_m^2} = [specifikt\_för\_luft] = \left(7{,}9158 \cdot 10^{-8}\right) \cdot \frac{1}{\rho} \tag{2.4}$$

Där:

n = molekylär koncentration (antal molekyler/m^3)

n kan beräknas genom att dividera Avogadros tal med molvolymen för en ideal gas. För luft vid standardförhållanden (293K, 1 atm) är $n = 2{,}5 \times 10^{25}$ /m^3.

d_m = *kollisionsdiametern för molekylerna, dvs. avståndet mellan centrum för två molekyler just när de kommer i kontakt med varandra alltså två gånger molekylradien (m)*

För luft vid standardförhållanden är λ=0,066 µm.

2.3 Beräkning av V_{TS} när 1.0 < *Re* < 1000

När *Re* > 1,0 kan inte ekvationerna 2.2 och 2.3 användas längre. Istället kan V_{TS} beräknas med ekvation 2.5:

$$V_{TS} = \sqrt{\frac{4\rho_p d_p g}{3C_D \rho_g}} \tag{2.5}$$

Där:

ρ_g = *densitet hos aerosolgasen (Kg/m*^{3}*)*

C_D =*luftmotståndskoefficient (dimensionslös)*

För att kunna använda ekvation 2.5 för att beräkna V_{TS} så måste ett korrekt värde på C_D alltså vara känd. För att beräkna C_D måste Re vara känt vilket i sin tur kräver att V_{TS} är känt. För att komma ur detta dilemma kan en iterativ process användas. Denna lämpar sig dock bäst för datorprogram men ett exempel visas i appendix. Ett annat sätt är att slå upp tabellerade värden på V_{TS} som dock kräver tillgång till tabellverk eller andra källor för dessa data. Kanske det mest praktiska sättet är att använda det empiriska sambandet 2.6 för att beräkna V_{TS}.

$$V_{TS} = \left(\frac{\eta}{\rho_g d_p}\right) e^{\left(-3{,}070+0{,}9935J-0{,}0178J^2\right)} \tag{2.6}$$

Där:

$$J = \ln\left(\frac{4\rho_p \rho_g d_p^3 g}{3\eta^2}\right)$$

Sambandet 2.6 ger V_{TS} med mindre än 3 % fel när 1 < *Re* < 600 och mindre än 7 % när 0,5 < *Re* < 1000. Om *Re* är mindre än 0,5 är det mer exakt att använda ekvation 2.2 för att beräkna V_{TS} (Hinds, s.57).

2.4 Beräkning av V_{TS} när 1000 < *Re* < 20000

Detta är inom Newtons område och berör normalt inte aerosolrörelser men inkluderas här för att framställningen skall bli mer komplett. Luftmotståndskoefficienten C_D kan i området 1000 < *Re* < 20000 approximeras till 0,44. Detta värde används i ekvation 2.5 för att ge V_{TS} (Hinds, s.62).

2.5 Beräkning av relaxationstiden τ

Relaxationstiden τ är den tid det tar för en partikel att anpassa sin hastighet till en ny uppsättning med yttre krafter som påverkar partikeln. τ definieras enligt ekvation 2.8 (Hinds, s.111):

$$\tau = \frac{V_{TS}}{g} \tag{2.8}$$

Där:

g =vakumaccelerationen för partikeln pga. krafterna som verkar på den, vanligtvis är detta tyngdaccelerationen (m/s^2)

För $Re < 1{,}0$ gäller specifikt:

$$\tau = \frac{\rho_p d_p^2 C_c}{18\eta} \tag{2.9}$$

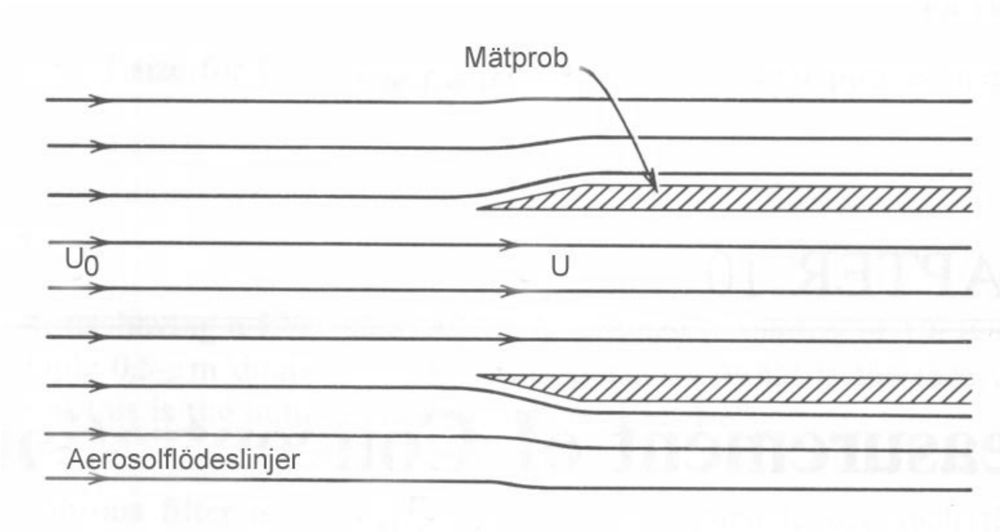
Ekvation 2.9 gäller för alla partiklestorlekar så länge som $Re < 1{,}0$ och C_c ges av ekvation 2.3.

3. Representativ provtagning när aerosolen är i rörelse

3.1 Isokintetisk provtagning

Det är möjligt att utföra en ideal provtagning av en strömmande aerosol, dvs. att koncentrationen och fördelningen av partiklar som sugs in i mätproben är den samma som i den ostörda aerosolen. Förutsättningen för detta är att provtagningen sker utan att omgivningen störs. Det finns tre kriterier som måste vara uppfyllda för att en provtagning skall kallas isokinetisk, figur 1:

1 Flödeshastigheten i mätproben, U, måste vara samma som den i aerosolen utanför proben, U_0.
2 Proben är riktad i aerosolens flödesriktning.
3 Proben är tunnväggig.



Figur 1. Isokinetisk provtagning av aerosol. $U_0 = U$.

Allmänt gäller sambandet 3.1 för isokinetisk provtagning i ett begränsat utrymme t.ex. en kanal eller ett rör med strömmande aerosol:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{A}{A_0} \qquad (3.1)$$

där:

Q = flödet i proben (m^3/s)
Q_0 = flödet i kanalen (m^3/s)
A = probens tvärsnittsarea (m^2)
A_0 = kanalens tvärsnittsarea (m^2)

För cirkulära prober kan flödeshastigheten, U, i proben uttryckas med sambandet:

$$U = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D_s{}^2} \qquad (3.2)$$

där:

U = flödeshastigheten i proben (m/s)
D_s = innerdiametern för proben (m)

Genom att sätta $U = U_0$ i ekvation 3.2 kan nu innerdiametern, D, för mätproben beräknas genom sambandet:

$$D_s = \sqrt{\frac{4Q}{\pi U_0}} \qquad (3.3)$$

där:

U_0 = flödeshastigheten i omgivningen (m/s)

Första villkoret för isokinetisk provtagning kan således bestämmas genom ekvation 3.3.

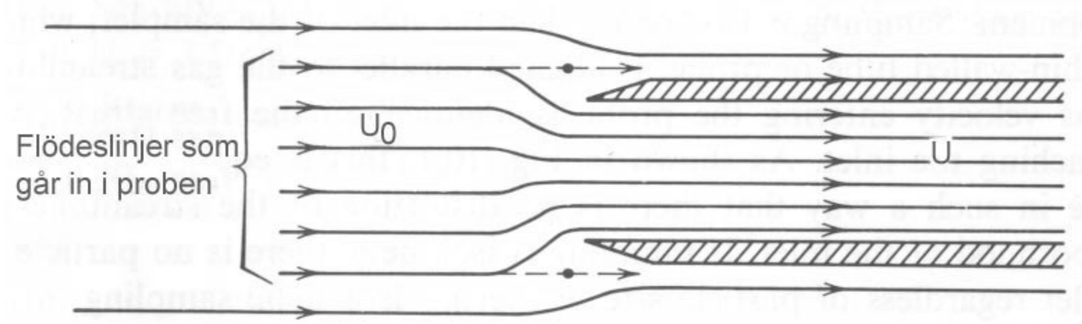
Tredje villkoret anses vara uppfyllt om förhållandet mellan probens ytter- och innerdiameter är mindre än 1,1.

3.2 Mätfel resulterande från felaktig mätteknik

Om flödeshastigheten i proben inte är den samma som i den omgivande aerosolen kommer mätfel att uppstå. Beroende på om U är större eller mindre än U_0 så kommer antalskoncentrationen av vissa partiklelstorlekar att under- respektive överskattas.

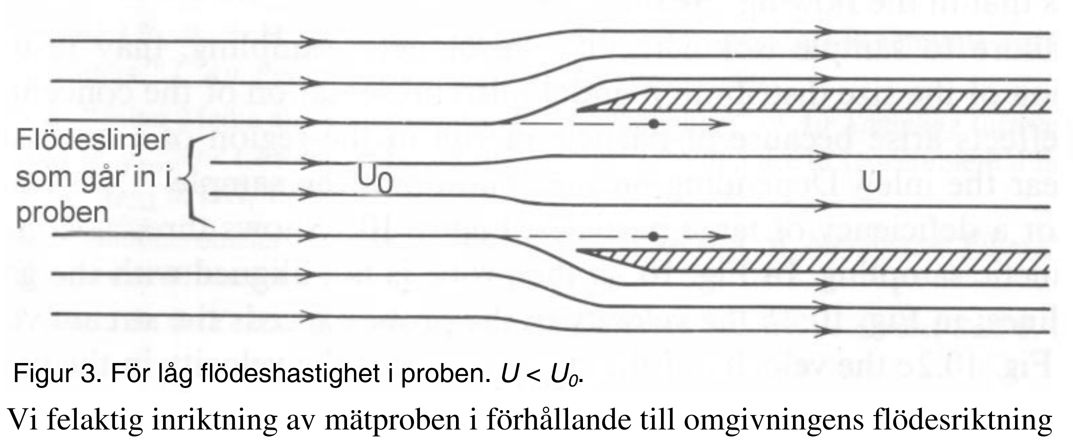
3.2.1 Mätfel härrörande från felaktig flödeshastighet i proben

Om $U > U_0$ kommer partiklar med tillräckligt stor tröghet att passera förbi munstyckets öppning alternativt impaktera på sidan av munstycket när flödeslinjerna viker av in i munstycket, figur 2. Detta kommer att resultera i en tilltagande underskattning av antalskoncentrationen av partiklar allt eftersom partikelstorleken ökar och kvoten U_0/U minskar.



Figur 2. För hög flödeshastighet i proben. $U > U_0$.

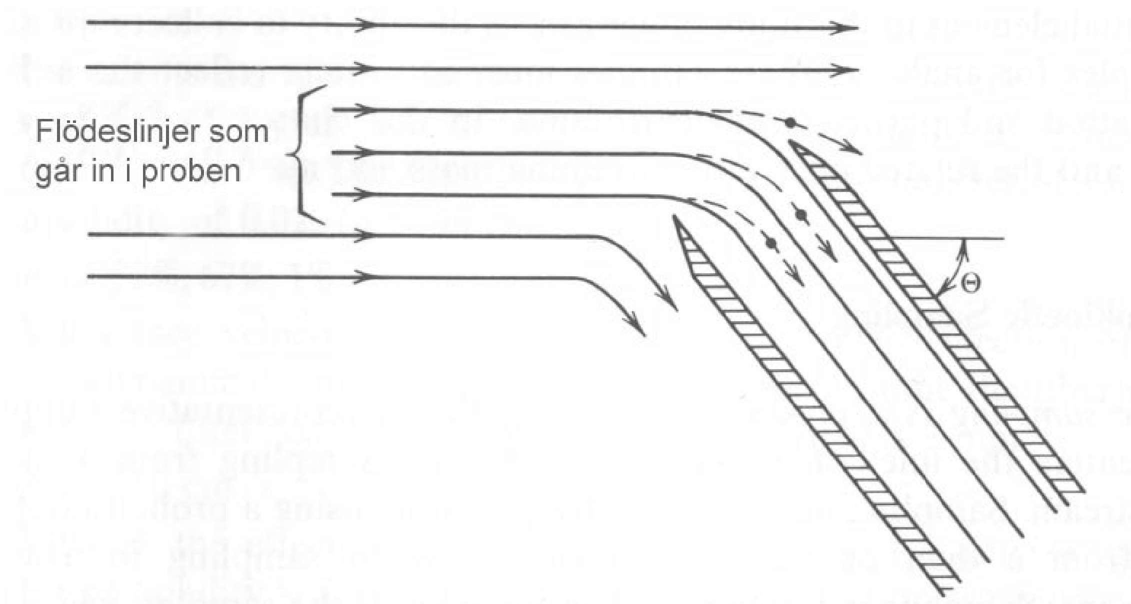
Partiklar med stor tröghet som vid isokinetiska förhållanden inte kommer att passera in i munstycket kan göra det om $U < U_0$, figur 3. En överrepresentation av dessa partiklar med stor tröghet kommer alltså att ske. Den maximala storleken på överrepresentationen kommer att gå mot kvoten U/U_0.



Figur 3. För låg flödeshastighet i proben. $U < U_0$.

Vi felaktig inriktning av mätproben i förhållande till omgivningens flödesriktning måste Stokes tal för probens inlopp tas med i beräkningarna.

Stokes tal = $Stk = \dfrac{\tau U_0}{D_s}$ (3.4)



Figur 4. Felaktig inriktning av proben. Θ är vinkelavvikelsen från flödeslinjerna.

När flödeshastigheten i proben är isokinetisk men proben inte är korrekt inriktad kommer koncentrationen att underskattas.

Det maximala felet som kan uppstå vid felaktig inriktning av propen är

$$\frac{C}{C_0} = \cos\Theta \quad \text{för } 0° < \Theta < 90° \text{ (figur 4) och } Stk > 6 \qquad (3.5)$$

Där:

C = partikelkoncentrationen i proben (antal/m^3)
C_0 = partikelkoncentrationen i omgivningen (antal/m^3)
Stk = Stokes tal för probens inlopp (dimensionslöst)

Ekvation 3.5 gäller endast stora och tunga partiklar ($Stk > 6$) som inte följer strömlinjerna på grund av sin tröghet, figur 4.

För $Stk < 0{,}01$ och $0{,}2 < U_0/U < 5$ är partiklarnas tröghet försumbar och $C/C_0 \approx 1$.

För $0{,}01 < Stk < 6$ är situationen mer komplicerad. Följande empiriska samband har föreslagits av Durham och Lundgren för dessa fall. Observera att flödeshastigheten skall vara isokinetisk (Durham et.al. 1980) :

$$\frac{C}{C_0} = 1 + (\cos\Theta - 1)\left(1 - \frac{1}{1 + 0{,}55(Stk')^{(0{,}25 Stk')}}\right) \qquad (3.6)$$

Där:
$Stk' = Stk^{(0,022\Theta)}$
$0° < \Theta < 90°$

När både flödeshastigheten i proben samt dess inriktning är felaktiga kan det maximala möjliga koncentreringsfelet uttryckas som:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{U}{U_0}\cos\Theta \tag{3.7}$$

Ekvation 3.7 indikerar att för varje felinriktning av proben finns det en motsvarande felinställning av flödeshastigheten i proben som tillsammans ger en koncentreringsfaktor lika med 1 (Hinds, s.212).

3.3 Mätteknik när aerosolen ändrar riktning under provtagningen

I vissa fall, t.ex. vid provtagning utomhus förekommer att aerosolen både är i rörelse och att den ändrar riktning medan provtagningen pågår.

Under sådana förhållanden kan följande åtgärder vidtas:

1. Använd en prob som ställer in sig med vinden (vindflöjel).
2. Rikta in proben i den huvudsakliga vindriktningen.

4. Representativ provtagning när aerosolen är stilla

För att veta när kriterierna för provtagning från stillastående aerosol är tillämpliga kan ekvation 4.1 tillämpas. Den har accepterats som ett kriterium för stillastående aerosol. Egentligen beskriver ekvation 4.1 den högsta vindhastighet som kan accepteras för att provtagningen skall kunna anses ske i stillastående aerosol (Hinds, s.215).

$$U_0 \leq \frac{1}{5}\left(\frac{Q}{4\pi\tau^2}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{4.1}$$

Det finns två felkällor vid provtagning från stillastående luft. En som härrör från partiklarnas fallhastighet och en från partiklarnas tröghet.

En felmätning pga. fallhastigheten hos partiklar uppstår när probens inloppshastighet är låg samt att proben är riktad uppåt. En överskattning av koncentrationen av partiklar med stor diameter resulterar från detta mätfel. Detta beroende på att partiklar som inte ingår i den provtagna volymen kommer att falla ner i probens inlopp genom gravitationell fällning av partiklar. I extremfallet med noll inloppshastighet kommer mätfelet att bli oändligt pga. partiklarna som gravitationellt faller ur aerosolen.

När proben är riktad nedåt erhålls på samma sätt en underskattning av koncentrationen av partiklar med stor diameter.

När proben är horisontellt inriktad erhålls inget mätfel på grund av partiklarnas fallhastighet.

Kriteriet för försumbar inverkan av partiklarnas fallhastighet oberoende av probens inriktning är (Davies, 1968):

$$U \geq 25V_{TS} \tag{4.2}$$

Ekvation 2.8 kan skrivas om till:

$$V_{TS} = \tau g \tag{4.3}$$

Med hjälp av ekvation 4.3 kan ekvation 4.2 skrivas om till:

$$D_s \leq \frac{2}{5}\left(\frac{Q}{g\pi\tau}\right)^{\frac{1}{2}} = D_{s_{MAX}} \tag{4.4}$$

Under standardförhållanden (g = 9.81 m/s^2; ρ_g = 1000 kg/m^3; η = 1.81·10^{-5} Ns/m^2) och med försummad korrektionsfaktor (C_c) kan ekvation 4.4 uttryckas som:

$$D_s \leq 680\left(\frac{Q^{\frac{1}{2}}}{d_p}\right) = D_{s_{MAX}} \tag{4.5}$$

Där D_s uttrycks i mm, Q i m^3/h och d_a i µm. Med D_s i cm, Q i cm^3/s och d_a i µm blir koefficienten 4.1.

d_p = aerodynamisk diameter hos partikel (m)

Ekvationerna 4.4 och 4.5 ger alltså en maximal diameter för probens öppning för att provtagningen skall vara opåverkad av partiklarnas fallhastighet oberoende av probens inriktning.

Även partiklars tröghet ger kan upphov till mätfel. På grund av sin tröghet har vissa partiklar en stoppsträcka som är stor jämfört med probens öppningsdiameter. Om partikeln sugs mot öppningen längs en krökt flödeslinje så kommer den att missa att bli insugen i proben. Antingen impakterar den på probens sida eller så skjuter den förbi öppningen utan att hinna sugas in. Det här mätfelet blir större för stora (tröga) partiklar samt för stora insugningshastigheter i proben.

Davies kriterium för försumbar inverkan av partiklarnas tröghet är:

$$D_s \geq 10\left(\frac{Q\tau}{4\pi}\right)^{\frac{1}{3}} = D_{s_{MIN}} \tag{4.6}$$

Under standardförhållanden och med försummad korrektion kan ekvation 3.6 uttryckas som:

$$D_s \geq 4{,}05 Q^{\frac{1}{3}} d_p^{\frac{2}{3}} = D_{s_{MIN}} \tag{4.7}$$

Där D_s uttrycks i mm, d_p i µm och Q i m^3/h. Med D_s i cm och Q i cm^3/s blir koefficienten 0,062 (Hinds, s. 214).

Ekvationerna 4.6 och 4.7 ger alltså en minsta diameter för probens mynning för att provtagningen skall vara opåverkad av partiklarnas tröghet oberoende av probens inriktning.

Notera att i ekvationerna 4.5 och 4.7 har vissa enheter bakats in i talen 680 respektive 4,05. Dessa ekvationer är approximativa och främst avsedda till snabba överslag. Annars rekommenderas användning av ekvationerna 4.4 och 4.6 som är dimensionsmässigt korrekta och uttryckta i SI-enheter.

För vissa värden på Q och τ kan D_{smin} bli större än D_{smax}. Båda kriterierna kan då alltså inte uppfyllas samtidigt. I så fall måste proben inriktas horisontellt så att inverkan av partiklarnas fallhastighet inte påverkar mätningarna och en minsta probdiameter beräknas enligt ekvation 4.4 eller 4.5.

Tillämpas ekvationerna 4.4 och 4.6 för att beräkna mätprobens mynningsdiameter blir mätningens onoggrannhet < 4 %.

Ett annat kriterium för att beräkna probdiametrar som ger representativ provtagning är Agrawals kriterium (4.8). Det är mindre restriktivt än Davies kriterier och baseras på flödessimuleringar runt en provtagningsmynning.

Agrawals kriterium ger en minsta munstycksdiameter för en tunnväggig prob som är riktad uppåt. Det ger ett fel på högst 10 % (Agrawal et al.1980).

$$D_s \geq 20\tau^2 g \tag{4.8}$$

5. Transportförluster

Även om provtagningen utförs med en korrekt utformad och inriktad prob så kan partiklar gå förlorade i rör, slangar och kopplingar.

För att minimera transportförluster bör rör och slangar där aerosol transporteras vara så raka och korta som möjligt samt ha samma diameter hela vägen. Materialet i slangar och rör bör ha ringa benägenhet till att bli elektrostatiskt laddat samt vara kemiskt inaktivt.

De mekanismer som ger upphov till transportförluster är (Hinds, s.216):

1 Interception
2 Tröghetsimpaktion
3 Diffusion
4 Gravitationell utfällning (gravitational settling)
5 Elektrostatisk attraktion

Av dessa är interception vanligen liten jämfört med de andra mekanismerna.

Utöver dessa kan termofores vara av betydelse när en varm aerosol transporteras genom kallare rör och slangar.

För laminärt flöde (Re < 2000) kan tröghetsdepositionen i en rörkrökning bestämmas genom det empiriska sambandet (5.1):

$$Krökningsförlust = (Stk)\phi \tag{5.1}$$

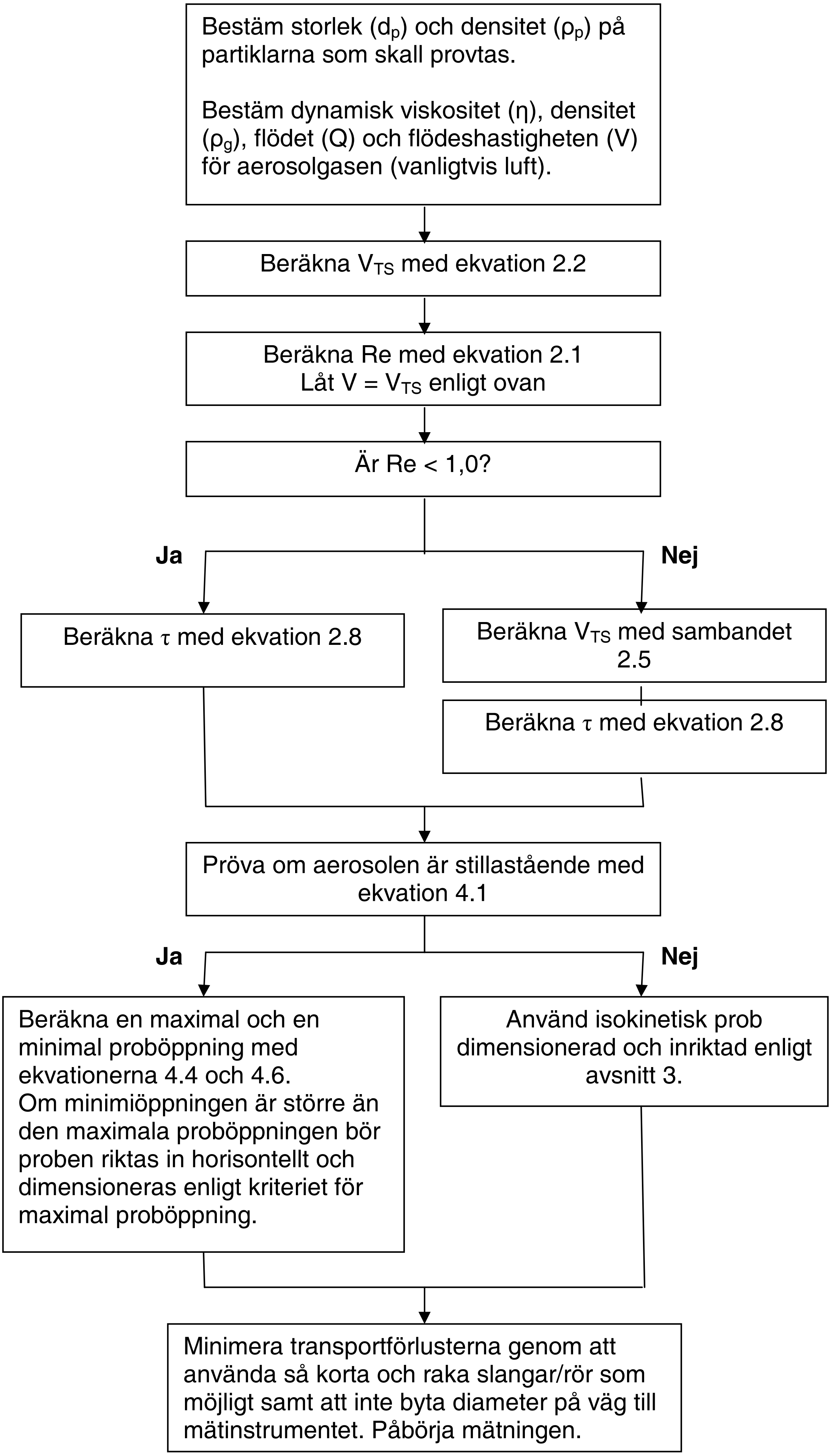
Där:
φ = krökningsvinkeln (rad)

$Stk = \dfrac{\tau U}{D_s}$ (dimensionslöst)

För turbulent flöde (Re > 4000) i en rörkrökning kan det empiriska sambandet (5.2) användas:

$$Krökningsförlust = 1 - e^{-2,88(Stk)\phi} \tag{5.2}$$

6. Lathund för val av mätprob


Bestäm storlek (d_p) och densitet (ρ_p) på partiklarna som skall provtas.
Bestäm dynamisk viskositet (η), densitet (ρ_g), flödet (Q) och flödeshastigheten (V) för aerosolgasen (vanligtvis luft).
Beräkna V_{TS} med ekvation 2.2
Beräkna Re med ekvation 2.1
Låt $V = V_{TS}$ enligt ovan
Är Re < 1,0?
Ja
Nej
Beräkna τ med ekvation 2.8
Beräkna V_{TS} med sambandet 2.5
Beräkna τ med ekvation 2.8
Pröva om aerosolen är stillastående med ekvation 4.1
Ja
Nej
Beräkna en maximal och en minimal proböppning med ekvationerna 4.4 och 4.6. Om minimiöppningen är större än den maximala proböppningen bör proben riktas in horisontellt och dimensioneras enligt kriteriet för maximal proböppning.
Använd isokinetisk prob dimensionerad och inriktad enligt avsnitt 3.
Minimera transportförlusterna genom att använda så korta och raka slangar/rör som möjligt samt att inte byta diameter på väg till mätinstrumentet. Påbörja mätningen.

7. Referenser

Agrawal, J K. Liu, B Y H. A Criterion for Accurate Aerosol Sampling in Calm Air. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 41. 1980.

Davies, C N. The Entry of Aerosols into Sampling Tubes and Heads. *Brit. J. Appl. Phys. (J. Phys. D)*, 1. 1968.

Durham, M D. Lundgren, D H. Evaluation of Aerosol Aspiration Efficiency as a Function of Stokes Number, Velocity Ration and Nozzle Angle. *J. Aerosol Sci*, 11. 1980.

Hinds, W C. Aerosol technology : properties, behavior, and measurement of airborne particles—2nd ed. 1999

Tritton, D J. Physical fluid dynamics—2nd ed. 1998.

Vincent, J H. Aerosol sampling : science and practice. 1989.

8. Appendix

8.1 Lista över symboler, konstanter, definitioner, ekvationer och samband

Symboler

Q = flödet i proben (m^3/s)
Q_0 = flödet i kanalen (m^3/s)
A = tvärsnittsarea för prob (m^2)
A_0 = tvärsnittsarea för kanal (m^2)
U = flödeshastigheten i prob (m/s)
U_0 = flödeshastigheten i omgivning (m/s)
D_s = innerdiametern för prob eller rör/slang (m)
$D_{s_{MIN}}$ = minsta möjliga innerdiameter för prob eller rör/slang (m)
$D_{s_{MAX}}$ = största möjliga innerdiameter för prob eller rör/slang (m)
d_p = diameter hos partikel (m)
d_m = kollisionsdiametern för molekyler, dvs. avståndet mellan centrum för två molekyler just när de kommer i kontakt med varandra, alltså två gånger molekylradien (m)
τ = relaxationstiden dvs. den tid det tar för en partikel att anpassa sin hastighet till en ny uppsättning med yttre krafter som påverkar partikeln. (s)
C = partikelkoncentration i prob (antal/m^3)
C_0 = partikelkoncentrationen i omgivningen (antal/m^3)
C_D =luftmostståndskoefficienten (dimensionslös)
Stk = Stokes tal (dimensionslöst)
V_{TS} =gränsfallhastigheten för partikel (terminal settling velocity) (m/s)
n = molekylär koncentration (antal molekyler/m^3)
λ= medelfria vägen för aerosolgasen (m)
g = tyngdaccelerationen (m/s^2)
φ = krökningsvinkeln (rad)
Re = Reynolds tal (dimensionslöst)
ρ_p = densitet för partikel (kg/m^3)
ρ_g = densiteten hos aerosolgas (Kg/m^3)
$\eta = \rho_g \nu$ = dynamisk viskositet hos aerosolgas, vanligtvis luft (Ns/m^2)
ν =kinematisk viskositet (m^2/s)

För luft vid havsytan och 293,15 K gäller:

η = viskositet, dynamisk = $1,8134\cdot10^{-5}$ kg/sm

λ = medelfriavägen = $0,066\cdot10^{-6}$ m

ρ = densitet = 1,2041 kg/m^3

n = molekylär koncentration = $2,5\cdot10^{25}/m^3$

Definitioner, ekvationer och samband

$$U = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D_s^{\ 2}} \text{ (m/s)} \tag{3.2}$$

$$D_s = \sqrt{\frac{4Q}{\pi U_0}} \text{ (m)} \tag{3.3}$$

$$Stk = \frac{\tau U}{D_s} \text{ (dimensionslöst)}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V d}{\eta} \text{(dimensionslöst)} \tag{2.1}$$

$$\tau = \frac{V_{TS}}{g} \text{ (s)} \qquad \text{(allmänt)} \tag{2.8}$$

$$\tau = \frac{\rho_p d_p^2 C_c}{18\eta} \text{(s)} \qquad \text{specifikt för Re} < 1{,}0 \tag{2.9}$$

$$V_{TS} = \tau g = \frac{\rho_p d_p^2 g C_c}{18\eta} \text{(m/s)} \qquad \text{för Re} < 1{,}0 \tag{2.3}$$

$$V_{TS} = \sqrt{\frac{4\rho_p d_p g}{3C_D \rho_g}} \text{(m/s)} \qquad \text{för Re} > 1{,}0 \tag{2.6}$$

$$V_{TS} = \left(\frac{\eta}{\rho_g d_p}\right) e^{\left(-3.070+0.9935J-0.0178J^2\right)} \text{(m/s) för } 0{,}5 < \mathrm{Re} < 1000 \tag{2.7}$$

$$J = \ln\left[C_D(\mathrm{Re})^2\right] = \ln\left(\frac{4\rho_p \rho_g d_p^3 g}{3\eta^2}\right) \quad \text{(till sambandet 2.7)}$$

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p}\left[2.34 + 1.05 e^{-0{,}39\frac{d_p}{\lambda}}\right] \text{ (dimensionslös)} \tag{2.4}$$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} n \pi d_m^2} \text{ (m)} \tag{2.5}$$

8.2 Lösta exempel

Observera att beräkningarna i följande exempel har utförts med elva decimalers precision i varje steg men för framställningens skull har avrundade värden redovisats.

Exempel 1.

Partiklar av uran med 25 µm diameter skall provtas utomhus med en partikelräknare i luft under standardförhållanden. Luften rör sig med en hastighet av 1 m/s. Partikelräknaren arbetar med 1 cfm flöde. Hur skall aerosolen provtas?

Lösning:

För att kunna välja rätt prob och provtagningsmetod måste korrekt fallhastighet bestämmas. Re beräknas för att bestämma vilka ekvationer som skall användas för fallhastigheten. När fallhastigheten är bestämd kan relaxationstiden bestämmas vilket gör att kriteriet för stillastående aerosol kan testas.

Känt:

$d_p = 25 \cdot 10^{-6} m$
$\rho_p = 18{,}9 \cdot 10^3 Kg/m^3$
$\rho_g = 1{,}2041\ Kg/m^3$
$\eta = 1{,}81 \cdot 10^{-5} Ns/m^2$
$g = 9{,}81\ m/s^2$
$\lambda = 0{,}066 \cdot 10^{-6}\ m$
$U_0 = 1\ m/s$
$Q = 1\ cfm = 28{,}3\ l/min = 4{,}72 \cdot 10^{-4}\ m^3/s$

Ekvation 2.2 och 2.3 används för att beräkna ett första värde på V_{TS}.

$$2.3:\ C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p}\left[2{,}34 + 1{,}05e^{-0{,}39\frac{d_p}{\lambda}}\right] = 1 + \frac{0{,}066 \cdot 10^{-6}}{25 \cdot 10^{-6}}\left[2{,}34 + 1{,}05e^{-0{,}39\frac{25 \cdot 10^{-6}}{0{,}066 \cdot 10^{-6}}}\right] = 1{,}006$$

$$2.2:\ V_{TS} = \frac{\rho_p d_p^2 g C_c}{18\eta} = \frac{18{,}9 \cdot 10^3 \cdot (25 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}006}{18 \cdot 1{,}81 \cdot 10^{-5}} = 0{,}358\ \text{m/s}$$

Reynolds tal blir med denna fallhastighet:

$$\text{Re} = \frac{\rho_g V_{TS} d_p}{\eta} = \frac{1{,}2041 \cdot 0{,}358 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{1{,}81 \cdot 10^{-5}} = 0{,}595$$

Eftersom Re < 1,0 är det med ekvation 2.2 beräknade värdet på V_{TS} korrekt.

Relaxationstiden τ kan nu beräknas med ekvation 2.8 eller 2.9.

$$\tau = \frac{V_{TS}}{g} = \frac{0{,}358}{9{,}81} = 0{,}036s$$

Kan aerosolen betraktas som stillastående vid denna provtagning? Ekvation 4.1 används för att testa detta:

$$U_0 \leq \frac{1}{5}\left(\frac{Q}{4\pi\tau^2}\right)^{\frac{1}{3}} = \frac{1}{5}\left(\frac{4{,}72 \cdot 10^{-4}}{4\pi(0{,}036)^2}\right) = 0{,}06 \text{ m/s}$$

då U_0 = 1 m/s > 0,06 m/s så kan inte kriterierna för stillastående provtagning användas. Istället får en isokinetisk prob beräknas.

Ekvation 3.3 ger diametern (D_s) för en cirkulär isokinetisk prob:

$$D_s = \sqrt{\frac{4Q}{\pi U_0}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4{,}72 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 4{,}0}} = 1{,}2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Notera de krav som gäller för proben. Den måste vara tunnväggig, dvs. förhållandet mellan probens ytter- och innerdiameter måste vara mindre än 1,1 samt inriktad i flödesriktningen. Eftersom provtagningen sker utomhus så bör helst en prob som ställer in sig i flödesriktningen användas. Finns inte en sådan att tillgå så bör proben riktas in horisontellt och i den huvudsakliga vindriktningen.

Svar: En cirkulär isokinetisk prob med diametern 12 mm kan användas för provtagningen.

Exempel 2.

En aerosol av slipdamm av betong i luft skall provtas vid standard förhållanden. De största partiklar som väntas ingå i aerosolen har 200 µm diameter. Betongen har en densitet på 2,4 kg/l. Aerosolen är stillastående. Vilken minsta diameter måste proben ha för att de största partiklarna skall kunna provtas utan förvrängning? En partikelräknare med 0,1 cfm flöde används till mätningarna.

Lösning:

Känt:

$d_p = 200 \cdot 10^{-6} m$
$\rho_p = 2{,}4 \cdot 10^3 Kg/m^3$
$\rho_g = 1{,}2041\ Kg/m^3$
$\eta = 1{,}81 \cdot 10^{-5} Ns/m^2$
$g = 9{,}81\ m/s^2$
$\lambda = 0{,}066 \cdot 10^{-6}\ m$
$Q = 0{,}1\ cfm = 2{,}83\ l/min = 4{,}72 \cdot 10^{-5}\ m^3/s$

Ekvation 2.2 och 2.3 används för att beräkna ett första värde på V_{TS}.

$$2.3:\ C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p}\left[2{,}34 + 1{,}05 e^{-0{,}39\frac{d_p}{\lambda}}\right] = 1 + \frac{0{,}066 \cdot 10^{-6}}{200 \cdot 10^{-6}}\left[2{,}34 + 1{,}05 e^{-0{,}39\frac{200 \cdot 10^{-6}}{0{,}066 \cdot 10^{-6}}}\right] = 1{,}00$$

$$2.2:\ V_{TS} = \frac{\rho_p d_p^2 g C_c}{18\eta} = \frac{2{,}4 \cdot 10^3 \cdot (200 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}00}{18 \cdot 1{,}81 \cdot 10^{-5}} = 2{,}89 \text{ m/s}$$

Reynolds tal blir med denna fallhastighet:

$$\text{Re} = \frac{\rho_g V_{TS} d_p}{\eta} = \frac{1{,}2041 \cdot 2{,}89 \cdot 200 \cdot 10^{-6}}{1{,}81 \cdot 10^{-5}} = 38{,}5$$

Eftersom Re >1,0 är det med ekvation 2.2 beräknade värdet på V_{TS} inte korrekt. Sambandet 2.6 kan användas för att beräkna ett approximativt värde på V_{TS} men för klarhetens skull skall den iterativa metod som omtalades i avsnitt 2.3 användas. Ekvation 2.5 kommer att användas för att beräkna ett nytt V_{TS} där C_D ges av det empiriska sambandet A.1 (Willeke, s.31). Ett nytt Re beräknas sedan för det nya V_{TS} varpå beräkningarna upprepas tills värdet på V_{TS} konvergerar.

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}}\left(1 + 0{,}158\,\text{Re}^{\frac{2}{3}}\right) \qquad 5 < \text{Re} < 1000 \tag{8.1}$$

Första iterationen:

$$\text{Re} = 38{,}5 \Rightarrow C_D = \frac{24}{38{,}5}\left(1 + 0{,}158(38{,}5)^{\frac{2}{3}}\right) = 1{,}75 \Rightarrow$$

$$V_{TS} = \sqrt{\frac{4\rho_p d_p g}{3 C_D \rho_g}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}4 \cdot 10^3 \cdot 200 \cdot 10^{-6} \cdot 9{,}81}{3 \cdot 1{,}75 \cdot 1{,}2041}} = 1{,}73 \text{ m/s}$$

Andra iterationen:

$$\text{Re} = \frac{\rho_g V_{TS} d_p}{\eta} = \frac{1{,}2041 \cdot 1{,}73 \cdot 200 \cdot 10^{-6}}{1{,}81 \cdot 10^{-5}} = 23{,}0 \Rightarrow C_D = 2{,}38 \Rightarrow V_{TS} = 1{,}48 \text{ m/s}$$

Tredje iterationen:

$$\text{Re} = 19{,}7 \Rightarrow C_D = 2{,}62 \Rightarrow V_{TS} = 1{,}41 \text{ m/s}$$

Fjärde iterationen:

$$\text{Re} = 18{,}8 \Rightarrow C_D = 2{,}71 \Rightarrow V_{TS} = 1{,}39 \text{ m/s}$$

Femte iterationen:

$$\text{Re} = 18{,}5 \Rightarrow C_D = 2{,}73 \Rightarrow V_{TS} = 1{,}38 \text{ m/s}$$

Sjätte iterationen:

$$\text{Re} = 18{,}4 \Rightarrow C_D = 2{,}74 \Rightarrow V_{TS} = 1{,}38 \text{ m/s}$$

Värdet på V_{TS} har nu konvergerat tillräckligt bra.

Relaxationstiden τ kan nu beräknas med ekvation 2.8 eller 2.9.

$$\tau = \frac{V_{TS}}{g} = \frac{1,38}{9,81} = 0,14s$$

Ekvation 4.6 ger nu den minsta probdiameter som kan användas utan att provtagningen förvrängs.

$$D_{s_{MIN}} \geq 10\left(\frac{Q\tau}{4\pi}\right)^{\frac{1}{3}} = 10\left(\frac{4,72\cdot 10^{-5}\cdot 0,14}{4\pi}\right)^{\frac{1}{3}} = 8,1\cdot 10^{-2}\,\mathrm{m}$$

<u>Svar: Den minsta probdiameter som kan användas är 8,1 cm. Detta resultat gäller oberoende av probens inriktning.</u>

Som jämförelse kan V_{TS} beräknas med ekvation 2.6:

$$V_{TS} = \left(\frac{\eta}{\rho_g d_p}\right) e^{\left(-3,070+0,9935J-0,0178J^2\right)} \qquad (2.6)$$

Där:

$$J = \ln\left[C_D(\mathrm{Re})^2\right] = \ln\left(\frac{4\rho_p\rho_g d_p^3 g}{3\eta^2}\right) = \ln\left(\frac{4\cdot 2,4\cdot 10^3\cdot 1,2041\cdot(200\cdot 10^{-6})^3\cdot 9,81}{3\cdot(1,81\cdot 10^{-5})^2}\right) = 6,83$$

Insatt i 2.6 fås:

$$V_{TS} = \left(\frac{1,81\cdot 10^{-5}}{1,2041\cdot 200\cdot 10^{-6}}\right) e^{(-3,070+0,9935\cdot 6,83-0,0178(6,83)^2)} = 1,34\,\mathrm{m/s}$$

Jämfört med det iterativt beräknade värdet avviker detta 2,9 %. Detta ligger inom den förväntade felmarginalen på < 3 % för 1 < Re < 600.

Exempel 3.

I en provkammare har en testaerosol av partiklar genererats. Partiklarna i aerosolen har en densitet på 1,0 kg/l och storlekar som sträcker sig från 1 µm till 25 µm. Den högsta flödeshastigheten i provkammaren är 0,2 m/s. Provtagningen skall ske representativt med en partikelräknare som arbetar med 0,1 cfm flöde. Beräkna en största och minsta diameter för proben som skall användas vid mätningarna. Standard-förhållanden gäller i provkammaren.

Lösning:

Först utförs beräkningarna av V_{TS}, Re, τ, minsta och största probdiametrar ($D_{smax,}$ $D_{smin)}$ för 1 µm partiklarna, sedan för 25 µm partiklarna. Egentligen skulle det räcka med att beräkna D_{smin} och D_{smax} för 25 µm storleken då dessa även skulle täcka in kraven för 1 µm storleken. För klarhetens skull beräknas dock värdena för båda partikelstorlekarna.

Känt:

d_{p1} = 1·10^{-6}m
d_{p25} = 25·10^{-6}m
ρ_p = 1,0·10^{3}Kg/m^{3}
ρ_g = 1,2041 Kg/m^{3}
η = 1,81·10^{-5}Ns/m^{2}
g = 9,81 m/s^{2}
λ = 0,066·10^{-6} m
Q = 0,1 cfm = 2,83 l/min=4,72·10^{-5} m^{3}/s
U_0 = 0,2 m/s

För 1,0 µm partiklar:

Ekvation 2.2 och 2.3 används för att beräkna V_{TS}.

$$2.3:\ C_c = 1+\frac{\lambda}{d_p}\left[2{,}34+1{,}05e^{-0{,}39\frac{d_p}{\lambda}}\right] = 1+\frac{0{,}066\cdot 10^{-6}}{1\cdot 10^{-6}}\left[2{,}34+1{,}05e^{-0{,}39\frac{1\cdot 10^{-6}}{0{,}066\cdot 10^{-6}}}\right] = 1{,}15$$

$$2.2:\ V_{TS} = \frac{\rho_p d_p^2 g C_c}{18\eta} = \frac{1{,}0\cdot 10^{3}\cdot(1\cdot 10^{-6})^2\cdot 9{,}81\cdot 1{,}15}{18\cdot 1{,}81\cdot 10^{-5}} = 3{,}48\cdot 10^{-5}\,\text{m/s}$$

Reynolds tal blir med denna fallhastighet:

$$\text{Re} = \frac{\rho_g V_{TS} d_p}{\eta} = \frac{1{,}2041\cdot 3{,}48\cdot 10^{-5}\cdot 1\cdot 10^{-6}}{1{,}81\cdot 10^{-5}} = 2{,}3\cdot 10^{-6}$$

Reynolds tal är alltså som väntat för denna partikelstorlek betryggande under 1,0. Det är korrekt att beräkna V_{TS} med ekvationerna 2.2 och 2.3.

Relaxationstiden blir nu:

$$\tau = \frac{V_{TS}}{g} = \frac{3{,}48\cdot 10^{-5}}{9{,}81} = 3{,}54\cdot 10^{-6}\,\text{s}$$

Kan aerosolen betraktas som stillastående vid denna provtagning? Ekvation 4.1 används för att testa detta:

$$U_0 \le \frac{1}{5}\left(\frac{Q}{4\pi\tau^2}\right)^{\frac{1}{3}} = \frac{1}{5}\left(\frac{4{,}72\cdot 10^{-5}}{4\pi(3{,}54\cdot 10^{-6})^2}\right)^{\frac{1}{3}} = 13{,}4\,\text{m/s}$$

För 1 µm partiklar kan en aerosolflödeshastighet på 2,5 m/s betraktas som stillastående. Kriterierna för dimensionering av prober för stillastående aerosol kan alltså användas.

$$D_{s,MIN} \ge 10\left(\frac{Q\tau}{4\pi}\right)^{\frac{1}{3}} = 10\left(\frac{4{,}72\cdot 10^{-5}\cdot 3{,}54\cdot 10^{-6}}{4\pi}\right)^{\frac{1}{3}} = 2{,}4\cdot 10^{-3}\,\text{m}$$

$$D_{s_{MAX}} \leq \frac{2}{5}\left(\frac{Q}{g\pi\tau}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{2}{5}\left(\frac{4,72\cdot 10^{-5}}{9,81\cdot\pi\cdot 3,54\cdot 10^{-6}}\right)^{\frac{1}{2}} = 2,6\cdot 10^{-1}\,\mathrm{m}$$

Notera att dessa dimensioner gäller oberoende av probens inriktning.

För 25 μm partiklar:

Ekvation 2.2 och 2.3 används för att beräkna V_{TS}.

2.3: $$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p}\left[2,34 + 1,05e^{-0,39\frac{d_p}{\lambda}}\right] = 1 + \frac{0,066\cdot 10^{-6}}{25\cdot 10^{-6}}\left[2,34 + 1,05e^{-0,39\frac{25\cdot 10^{-6}}{0,066\cdot 10^{-6}}}\right] = 1,006$$

2.2: $$V_{TS} = \frac{\rho_p d_p^2 g C_c}{18\eta} = \frac{1,0\cdot 10^3\cdot(25\cdot 10^{-6})^2\cdot 9,81\cdot 1,006}{18\cdot 1,81\cdot 10^{-5}} = 1,89\cdot 10^{-2}\,\mathrm{m/s}$$

Reynolds tal blir med denna fallhastighet:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_g V_{TS} d_p}{\eta} = \frac{1,2041\cdot 1,89\cdot 10^{-2}\cdot 25\cdot 10^{-6}}{1,81\cdot 10^{-5}} = 3,1\cdot 10^{-2}$$

Reynolds tal är < 1,0 även för 25 µm storleken. Det är korrekt att beräkna V_{TS} med ekvationerna 2.2 och 2.3.

Relaxationstiden blir nu:

$$\tau = \frac{V_{TS}}{g} = \frac{1,89\cdot 10^{-2}}{9,81} = 1,93\cdot 10^{-3}\,s$$

Kan aerosolen betraktas som stillastående vid denna provtagning? Ekvation 4.1 används för att testa detta:

$$U_0 \leq \frac{1}{5}\left(\frac{Q}{4\pi\tau^2}\right)^{\frac{1}{3}} = \frac{1}{5}\left(\frac{4,72\cdot 10^{-5}}{4\pi(1,93\cdot 10^{-3})^2}\right)^{\frac{1}{3}} = 0,20\,\mathrm{m/s}$$

Även för 25 µm partiklarna kan luften betraktas som stillastående, även om det är precis på gränsen (U_0 är ju maximalt 0,2 m/s). Probdimensionerna blir för 25 µm partiklarna:

$$D_{s_{MIN}} \geq 10\left(\frac{Q\tau}{4\pi}\right)^{\frac{1}{3}} = 10\left(\frac{4,72\cdot 10^{-5}\cdot 1,93\cdot 10^{-3}}{4\pi}\right)^{\frac{1}{3}} = 1,93\cdot 10^{-2}\,\mathrm{m}$$

$$D_{s_{MAX}} \leq \frac{2}{5}\left(\frac{Q}{g\pi\tau}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{2}{5}\left(\frac{4,72\cdot 10^{-5}}{9,81\cdot\pi\cdot 1,93\cdot 10^{-3}}\right)^{\frac{1}{2}} = 1,13\cdot 10^{-2}\,\mathrm{m}$$

I detta fall blir alltså D_{smin} större än D_{smax}. Eftersom det inte går att förlika dessa båda krav måste proben placeras med horisontell inriktning (för att fallhastighetens inverkan skall kunna försummas) och dimensioneras enligt kravet för D_{smin} för 25 µm partiklar. Det är också tydligt att dimensionerna för 25 µm partiklar också täcker in kraven för 1,0 µm partiklar (plus alla andra partikelstorlekar mellan 1,0 och 25,0 µm också).

<u>Svar: Proben skall ha en minsta diameter på 19,3 mm och måste riktas in horisontellt för att provtagningen skall bli representativ.</u>

Notera att det lätt kan uppstå en situation där en del av partiklarna i aerosolen kräver isokinetisk provtagning medan de andra inte kräver det. I så fall får den isokinetiska proben användas för provtagningen av alla partikelstorlekar. Detta innebär dock en begränsning i försöksuppställningen/mätningen då proben måste riktas in mot flödesriktningen för aerosolen. Vid provtagning med en prob för stillastående aerosol är provtagningen oberoende av probens inriktning. Det kan i vissa fall, t.ex. provtagning i små utrymmen, uppstå en situation där flödet går i flera riktningar och att det därför är svårt att avgöra vilken inriktning proben skall ha. I så fall kan en isokinetisk prob vara olämplig och provtagningen får begränsas till de partikelstorlekar som kan använda en prob för stillastående aerosol. Givetvis kommer instrumentet då också att samla in en del av de större partiklarna som egentligen kräver isokinetisk provtagning men provtagningen av dem kommer inte att vara representativt för vad som verkligen finns i aerosolen.

Exempel 4.

Låt oss ändra exempel 3 så att den maximala flödeshastigheten i provkammaren är 2 m/s. Nu kan 25 µm partiklar inte provtas enligt kriterierna för stillastående aerosol utan isokinetisk provtagning måste tillämpas. Provkammaren har ett tvärsnitt i flödesrikningen på 80 x 80 cm. Beräkna en isokinetisk probdiameter. Kan den isokinetiska proben även provta 1,0 µm partiklarna utan förvrängning även om proben inte är perfekt inriktad? Hur stora partiklar kan provtas utan förvrängning oberoende av inriktningen?

Lösning:

En isokinetisk prob dimensioneras för 25 µm partiklarna med ekvation 3.3. Sedan jämförs dess diameter med kraven på probdiameter för 1,0 µm partiklarna som beräknades i exempel 3.

Känt:

$Q = 0{,}1\ cfm = 2{,}83\ l/min = 4{,}72 \cdot 10^{-5}\ m^3/s$
$U_0 = 2{,}0\ m/s$

Ekvation 3.3 ger diametern (D_s) för en cirkulär isokinetisk prob:

$$D_s = \sqrt{\frac{4Q}{\pi U_0}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4{,}72 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot 2{,}0}} = 5{,}5 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}$$

Notera att ytterligare krav nu har tillkommit på proben. Den måste vara tunnväggig, dvs. förhållandet mellan probens ytter- och innerdiameter måste vara mindre än 1,1. Den måste dessutom vara inriktad i flödesriktningen.

För 1,0 µm partiklar krävdes en minsta probdiameter (D_{smin}) på $2{,}4\cdot10^{-3}$ m och en maximal diameter (D_{smax}) på $2{,}6\cdot10^{-1}$ m. Eftersom den isokinetiska proben uppfyller dessa villkor kan den också användas för att provta 1,0 µm partiklarna utan förvrängning oberoende av inriktningen.

För att se hur långt upp i partikelstorlek detta gäller blir frågan nu vilka partikelstorlekar har en D_{smin} mindre än $5{,}5\cdot10^{-3}$m? Följande samband kan ställas upp:

$5{,}5\cdot10^{-3} \geq D_{s_{MIN}} = 10\left(\frac{Q\tau}{4\pi}\right)^{\frac{1}{3}}$ vilket kan formas om till:

$$\tau \leq \frac{D_{s_{MIN}}^3 4\pi}{10^3 Q}$$

Med $\tau = \frac{V_{TS}}{g}$ så fås:

$$V_{TS} \leq \frac{D_{s_{MIN}}^3 4\pi g}{10^3 Q} = \frac{\left(5{,}5\cdot10^{-3}\right)^3\cdot4\pi\cdot9{,}81}{10^3\cdot4{,}72\cdot10^{-5}} = 4{,}3\cdot10^{-4}\,\text{m/s}$$

En jämförelse med tabellerade värden för V_{TS} under standardförhållanden och 1,0 kg/l partikeldensitet visar att denna V_{TS} uppnås någonstans mellan 3 ($V_{TS} = 2{,}85\cdot10^{-4}$ m/s) och 4 µm ($V_{TS} = 5{,}00\cdot10^{-4}$ m/s) partikelstorlek (Hinds, s.485). Den isokinetiska proben ger alltså oförvrängd provtagning upp till något mer än 3 µm partikelstorlek oberoende av inriktning.

<u>Svar: Den isokinetiska proben skall ha en diameter på $5{,}5\cdot10^{-3}$ m om den har cirkulärt tvärsnitt. Den kan även användas för provtagning av partiklar upp till något mer än 3 µm oberoende av inriktningen.</u>