

ORIENTERING FRA MILJØSTYRELSENS REFERENCELABORATORIUM FOR STØJMÅLINGER

MÅLING AF STØJ FRA SKORSTENE

Orientering nr. 21

Jørgen Jakobsen/JK1/bm

1993-09-22

NY METODE TIL MÅLING AF SKORSTENES KILDESTYRKE

I dette nummer af Orientering fra Referencelaboratoriet beskrives en ny målemetode til bestemmelse af kildestyrken af skorstene. Metoden er et gyldigt alternativ til at måle lydtrykniveauet i nærheden af skorstenstoppen, hvilket er nødvendigt ved de sædvanligt benyttede målemetoder.

Målemetoden baserer sig på rapporten "Støj fra skorstene. Metode til måling af skorstenes kildestyrke", LI 930/91, som blev udarbejdet af Lydteknisk Institut i 1991. Der er siden rapportens udgivelse opnået adskillige erfaringer med brug af metoden, og der er udviklet en mere hensigtsmæssig målesonde, som beskrives i denne "Orientering".

Baggrund og formål

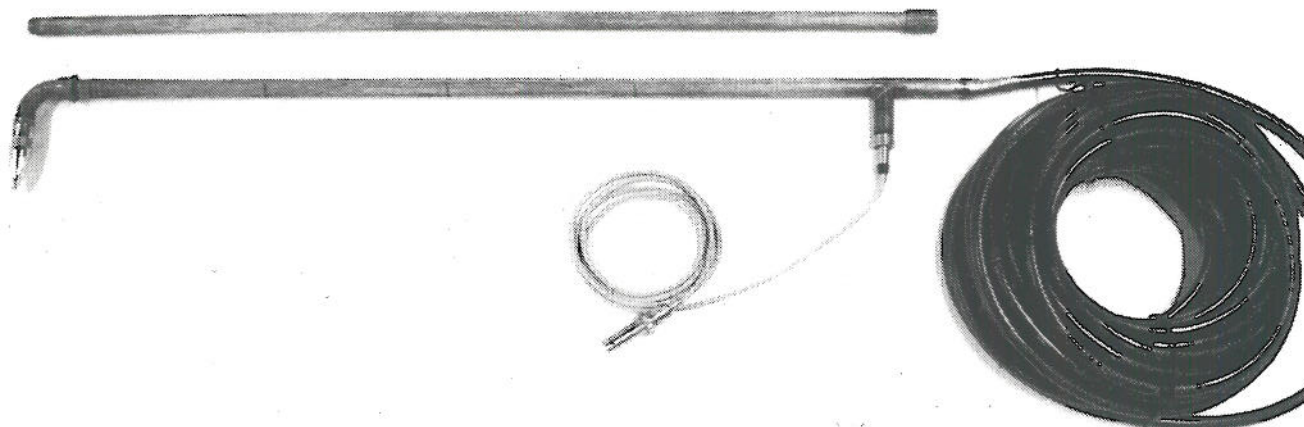
Formålet med dette nummer af "Orientering" er at udbrede kendskabet til en hensigtsmæssig metode til at måle skorstenes kildestyrke.

Sædvanligvis bestemmes kildestyrken af skorstene og tilsvarende højt placerede afkast ved brug af "kuglemetoden", jf. [1], hvortil lydtrykniveauet skal måles i punkter mellem 5° og 20° over skorstensmundingen. Især ved store skorstene er det et besværligt og ikke altid ufarligt arbejde, og det er forekommet i konkrete tilfælde at det af sikkerhedsmæssige årsager ikke har været muligt at gennemføre målingerne. Dette er meget uheldigt, da støjen fra skorstene ofte er blandt de mest betydende støjbidrag fra virksomheder.

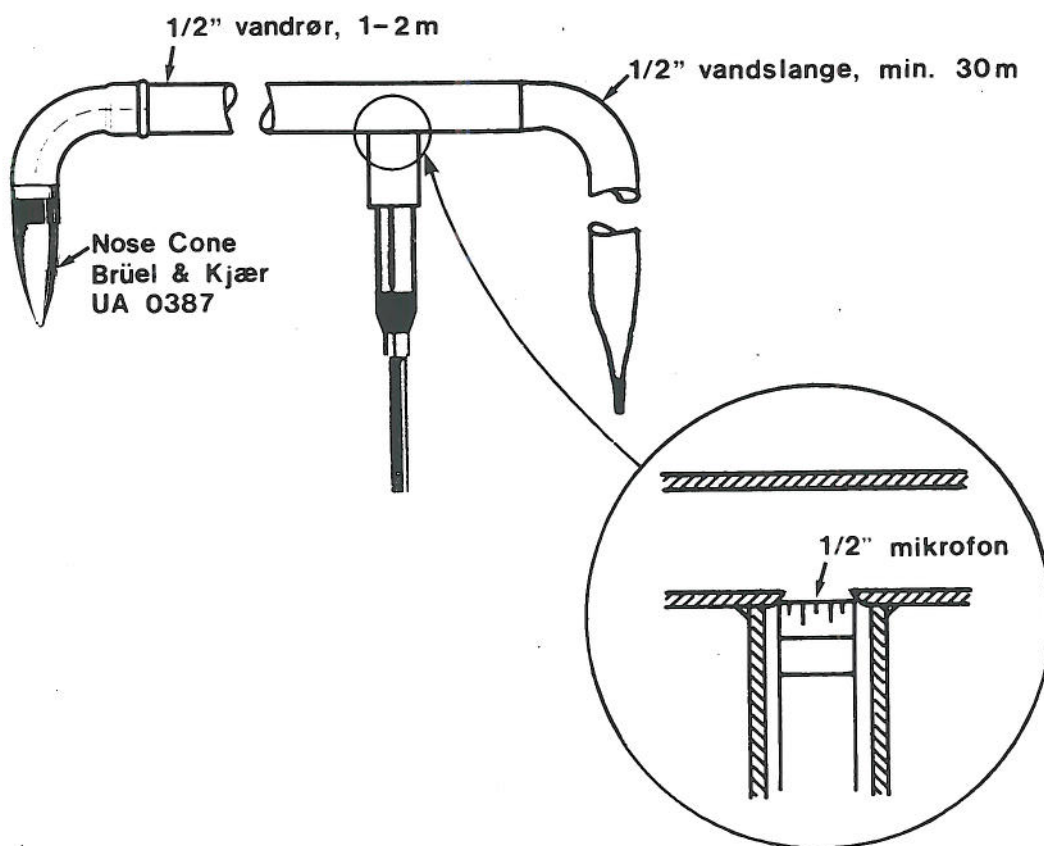
Den omtalte målemetode har principielt i en årrække været brugt af enkelte firmaer herhjemme og i udlandet [2], og blev i en opdateret udgave publiceret i en rapport fra Lydteknisk Institut i 1991 [3]. Ved metodens senere brug er det fundet, at nogle af de forenklende antagelser, der er gjort bl.a. i [3], med fordel kan udelades. Desuden er der fundet en betydende trykfejl i rapportens udtryk for kildestyrken, som hermed korrigeres.

1. MÅLEMETODENS PRINCIP

Lydtrykniveauet inde i skorstenen måles ved hjælp af en målesonde, som beskytter mikrofonen mod den varme (og ofte korrosive) afkastluft. Målesonden føres ind i skorstensrøret gennem en prøvetagningsstuds, renselem eller tilsvarende. Målesonden er vist på fotoet Figur 1 og i principtegningen Figur 2.



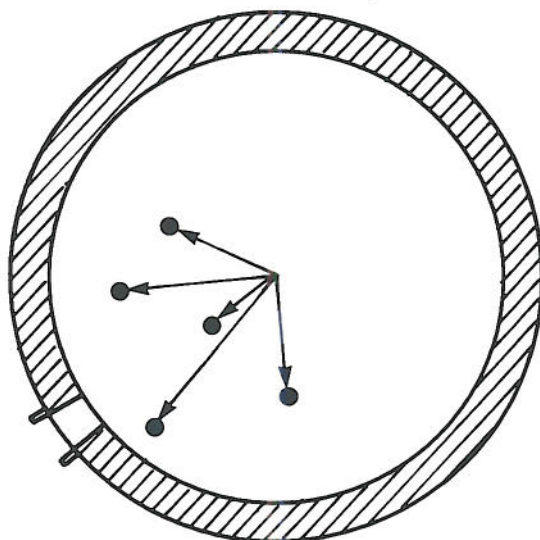
Figur 1 Foto af en målesonde bestående af to rør á 1 m, som kan skrues sammen.



Figur 2 Principtegning af målesonde.

Lydtrykniveauet måles i mindst 30 sekunder i hvert af mindst 5 punkter, som er fordelt tilfældigt over skorstensrørets tværsnit. Målepunkterne skal vælges såvel på forskellige radier som i

forskellige afstande fra centrum, og må ikke være for tæt ved skorstensvæggen, jf. Figur 3. Som alternativ til at måle i 5 diskrete punkter kan målesondens spids med rolige bevægelser føres (scannes) rundt omkring i skorstenstværsnittet i løbet af ca. 3 minutter. Ved brug af scanning skal man passe på ikke at frembringe skrabelyde med sonden.



Figur 3 Eksempel på fordeling af målepunkter i et tværsnit af en skorsten.

Lydtrykniveauet analyseres i 1/1-oktavbåndene mellem 63 Hz og 8 kHz, og energimiddelværdien af lydtrykniveauet i de 5 punkter beregnes. Hvis der benyttes scanning er ækvivalentniveauet over scanningperioden det samme som energimiddelværdien over tværsnittet.

Om muligt måles baggrundsstøjen, herunder især vindstøjen fra luftens strømning omkring målesonden, i et par af målepunkterne. I de fleste tilfælde er dette imidlertid ikke muligt, fordi den væsentligste skorstensstøj hidrører fra den ventilator, som også forårsager luftstrømningen. I sådanne tilfælde kan baggrundsstøjen skønnes, bl.a. ud fra angivelserne i Figur 5 og Tabel 2.

Skorstensrørets tværsnitsareal ud for prøvetagnings-studsen/reuselemmen bestemmes, og afstanden målt langs røgrøret fra prøvetagningsstudsen til skorstenstoppen bestemmes også.

Skorstenens kildestyrke er:

$$L_{w\Phi} = \overline{L_p} + \Delta L_m + \ell \cdot \Delta L_l + \Delta L_\Phi + 10 \log S + 3$$

hvor: $\overline{L_p}$ er lydtrykniveauet, som er målt som energimiddelværdien af mindst 5 måleresultater fra et tværsnit ud for prøvetagningsstudsens, eventuelt korrigeret for baggrundsstøj

ΔL_m er korrektionen for målesondens frekvenskarakteristik, se Afsnit 2

ΔL_l er korrektionen for dæmpning af lyden i skorstenen, se Afsnit 3

ℓ er afstanden (i meter) fra prøvetagningsstudsens til munden

ΔL_Φ er retningskorrektionen, se Afsnit 4, og

S er arealet i (m²) af skorstenstværsnittet ud for prøvetagningsstudsens.

Det anslås, at ubestemtheden ved brug af målemetoden er 5 dB, da der er nogen usikkerhed knyttet til de anførte værdier for lydets dæmpning i skorstene og især til retningskorrektionen. Ubestemtheden er således i almindelighed lidt større end ved brug af "kuglemetoden".

2. MÅLESONDE

En egnet målesonde er vist på fotoet i Figur 1 og på principtegningen Figur 2. Den består af et ½" vandrør, hvori en ½" trykmikrofon (som fx Brüel & Kjær 4166 eller 4134) er anbragt så tæt ved rørvæggen som praktisk muligt. Det viste siderør på Figur 2 og på fotoet Figur 4a tjener til at styre og fastholde mikrofonen, men fastgørelsen kan også løses på andre måder. Som vist på Figur 2 er hullet i ½" vandrøret, hvori mikrofonen monteres, ikke boret helt igennem. Herved opstår der en undersænkning, som styrer mikrofonens gitter.

Det er ikke nødvendigt at mikrofonen slutter helt lufttæt til ½" vandrøret, men ved måling i skorstene med overtryk er det så nødvendigt at tætnes mellem forforstærkeren og siderøret eller på

anden måde sikre, at den varme røggas ikke siver ind gennem sonden og ud forbi mikrofonen.

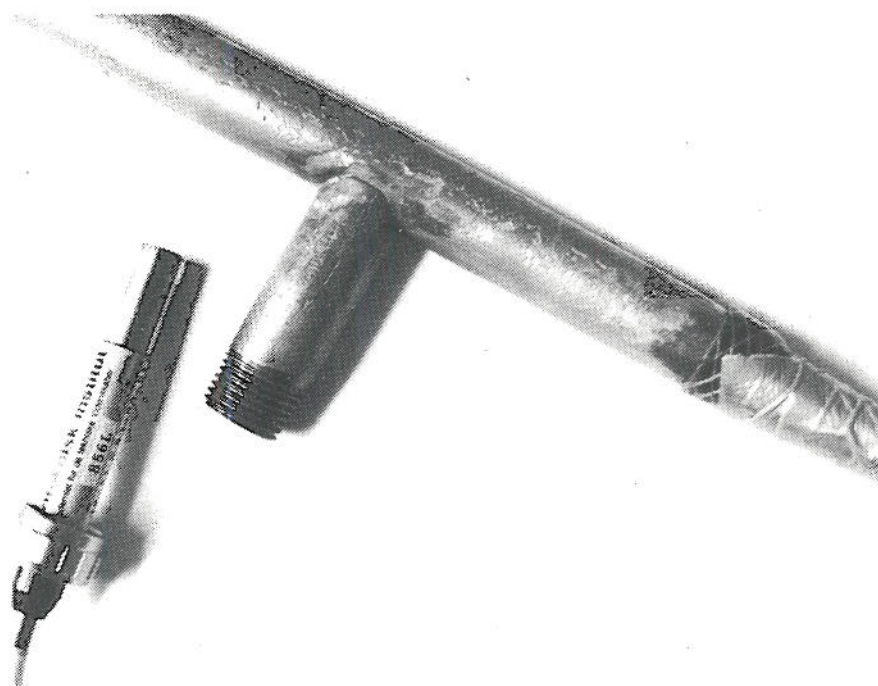
Hvis der ikke bruges en trykmikrofon men en sædvanlig $\frac{1}{2}$ " fritfeltmikrofon (som fx Brüel & Kjør 4165), kan måleresultaterne korrigeres til tilnærmede trykværdier ved at fratrække korrektionerne i Tabel 1 nedenfor.

1/1-oktav center-frekvens, Hz	63-1000	2000	4000	8000
Korrektion, dB	0	0,5	1	3,5

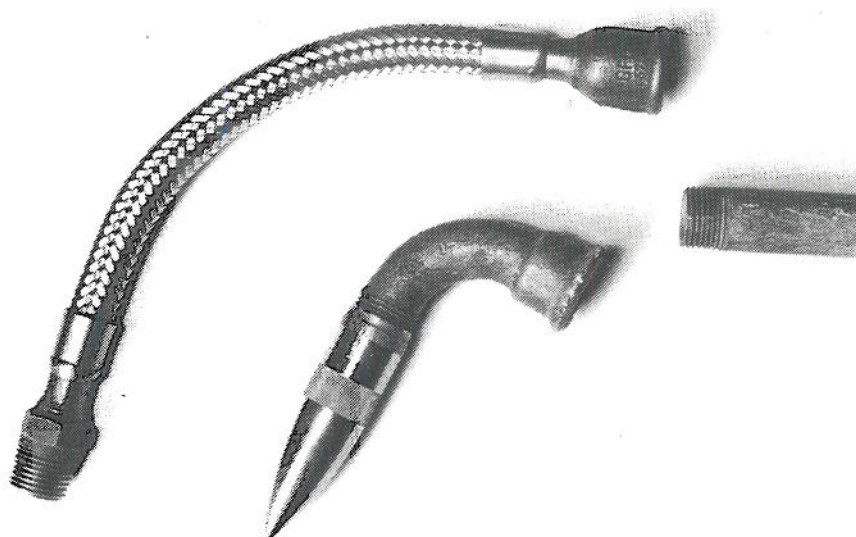
Tabel 1 Korrektioner for en $\frac{1}{2}$ " fritfeltmikrofon til tilnærmet lineær trykarakteristik. Korrektionerne skal trækkes fra de målte lydtrykniveauer.

Sonderøret kan være 1-2 m langt, og kan for eksempel udføres af sammenskruede længder af vandrør.

Den bagerste ende af sonderøret skal være reflektionsfri. Dette opnås ved at forbinde sonden med en lang vandslange, som er klemmt til i den modsatte ende. Vandslangen og sonderøret skal have samme indvendige diameter, og vandslangen skal være mindst 30 m lang. Overgangen fra sonderør til vandslange skal være så jævn som muligt, og den skal være helt tæt, se fotoet Figur 4a.



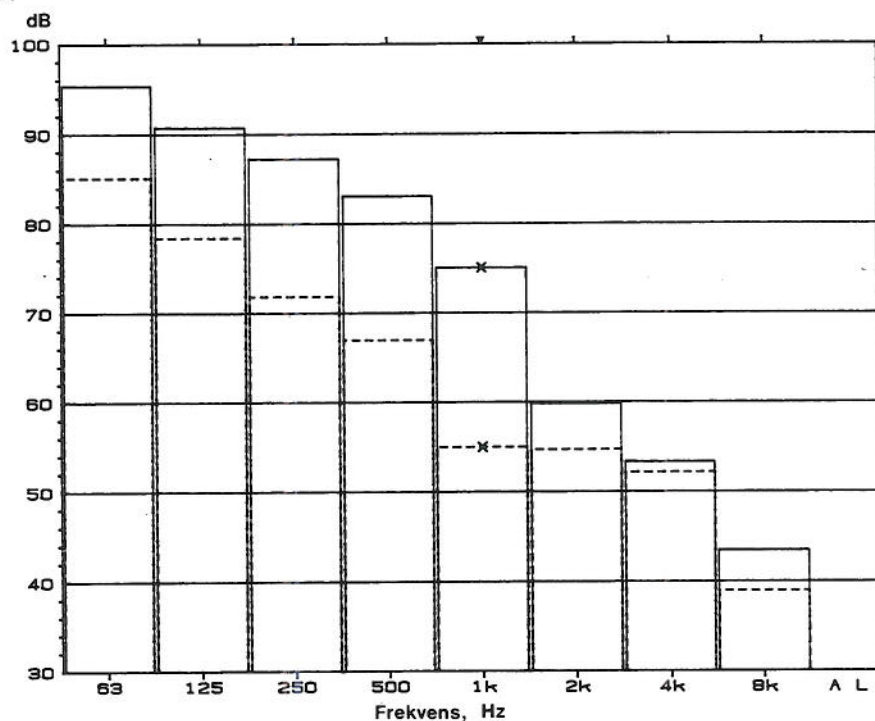
Figur 4a Foto af tilkoblingen af en vandslange til bagenden af sonderøret.



Figur 4b Foto af tilslutning af næsekonus med $\frac{1}{2}$ " bøjning eller - alternativt - med varmebestandig flexslange.

Forenden af sonderøret forbindes med en næsekonus (Brüel & Kjør UA 0387), se fotoet Figur 4b, hvis spids rettes imod strømningsretningen og derved reducerer vindstøjen med over 10 dB i det meste af frekvensområdet. Figur 5 (og Tabel 2) viser vindstøjen ved en strømningshastighed på 7 m/s. Disse resultater kan benyt-

tes som skøn over baggrundsstøjen/vindstøjen i de tilfælde, hvor den ikke er målt. Der kan regnes overslagsmæssigt med, at vindstøjen forøges med 15-20 dB ved fordobling af lufthastigheden.



Figur 5 Lydtrykniveau af vindstøj ved 7 m/s lufthastighed, målt med sonden. Lydtrykniveauerne er uvægtede (lineære).

-----: sonde med næsekonus
 —————: sonde uden næsekonus

1/1-oktav centerfrekvens, Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Sonde uden næsekonus	95,3	90,8	87,2	83,1	75,0	59,9	53,3	43,5
Sonde med næsekonus	84,6	78,4	71,7	67,2	54,8	54,3	51,8	38,8

Tabel 2 Lydtrykniveau af vindstøj (lineært, dB re 20 μ Pa) ved 7 m/s lufthastighed, som i Figur 5.

For at kunne rette næsekonusen imod strømningshastigheden er den tilkoblet sonden med en 90° bøjning, som vist på Figurerne 1, 2 og 4b. Gevindet på næsekonusen passer ikke direkte på

pipehovedet; det er nødvendigt at tilpasse, fx ved brug af en ½" omløber eller andre fittings, smådele og fingerfærdighed.

I nogle tilfælde kan det være vanskeligt at få ført næsekonus og bøjning ind gennem en snæver prøvetagningsstuds, og der er derfor udviklet en fleksibel overgang, som kan benyttes i stedet for bøjningen. Den fleksible overgang er fremstillet af en 10 mm helmetalsslange med omfletning, svejst på ½" overgangsmuffer som vist øverst på fotoet Figur 4b. (leveres fx af fa. Hans Teller A/S, tlf. 42 45 80 66. BOA Supra DN 10, længde 300 mm, forsynet med overgangsstykker 3/8" til 1/2").

Næsekonusen og bøjningen påvirker mikrofonens frekvenskarakteristik, og det er nødvendigt at korrigere ved at addere korrektionerne fra Tabel 3.

1/1-oktav center-frekvens, Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Kort sonde, 90° bøjning	0	0,5	1	3,5	5	3,5	5,5	8
Kort sonde, flexibel slange	0	0,5	3	4,5	5,5	6	8,5	12,5
Lang sonde, 90° bøjning	0	1	1,5	4,5	6	5	7,5	11
Lang sonde, flexibel slange	0,5	1	5	5,5	7	8,5	12	18,5

Tabel 3 Korrektioner for målesondens frekvenskarakteristik, dB. Korrektionerne skal adderes til de målte lydtrykniveauer.

3. LYDENS UDBREDELSE I SKORSTENE

Det har vist sig i praksis, at lyden kun dæmpes ubetydeligt ved udbredelse op gennem skorstene. Dæmpningen øges med frekvensen og med længden af skorstensrøret, og afhænger i første række af tilsmudsningens graden af skorstenen. Tabel 4 giver to sæt dæmpningskonstanter til brug for henholdsvis ibrugværende (tilsmudsede) skorstene og nye (eller helt rene) skorstene.

Støj med dominerende indhold af toner kan udvise betydelige afvigelser fra det nævnte, simple mønster. Det kan forekomme, at toner næsten ikke dæmpes op gennem en skorsten på ca. 100 m, og der kan også forekomme store lokale variationer af tonernes lydtrykniveau. Det anbefales at benytte værdierne i Tabel 4 som den bedste generelle tilnærmelse også i sådanne tilfælde.

1/1-oktav centerfrekvens, Hz		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Dæmpning i skorsten ΔL_t dB/m	Nye skorstene	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,10	0,15
	Ibrugværende skorstene	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,15	0,2	0,3

Tabel 4 Dæmpning af støjen ved transmission gennem skorstene. Værdierne for nye skorstene benyttes i forbindelse med projektering og desuden ved rene stålskorstene/-afkast.

På grund af usikkerheden omkring toners udbredelse i skorstene er det ikke ud fra sonde målinger muligt at drage nogen præcise konklusioner om forekomsten af tydeligt hørbare toner i støjen fra skorstene. Det er dog sandsynligt, at hvis en måling med sonden viser fremtrædende toner, vil de samme toner være tydeligt til stede ved skorstenstoppen, og at der i tilfælde, hvor målingen med sonden ikke indeholder toner, heller ikke vil være toner i støjen ved skorstenstoppen.

4. LYDUDSTRÅLING FRA TOPPEN AF SKORSTENE

Støjen fra skorstene udstråles med forskellig styrke i forskellige retninger med lodret. Støjen er betydeligt kraftigere i retninger opad ("foran" skorstensåbningens plan, når man kigger i akseretningen) end nedad. Retningsvirkningen afhænger af skorstensrørets diameter, og påvirkes af såvel strømningshastigheden som af mundingstemperaturen. Disse forhold er beskrevet i [3], og resumeres nedenfor.

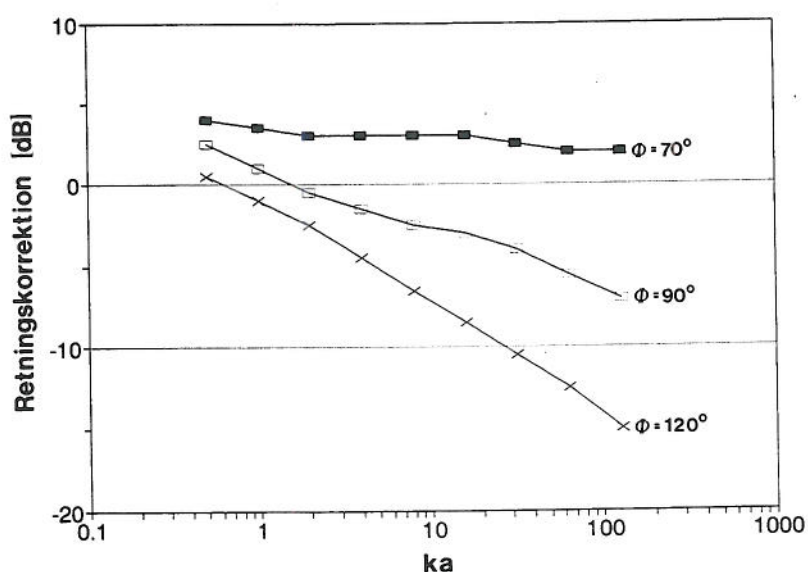
Retningsvirkningen påvirkes desuden af vejrforholdene (vindhastighed og -retning, lufttemperatur), som også har væsentlig indflydelse på hvordan lyden udbreder sig fra skorstensmundingen. Denne vekselvirkning er endnu ikke afklaret tilfredsstillende. Det antages indtil videre (i overensstemmelse med anvisningerne i [1]), at den kildestyrke som skal benyttes til at beregne støjen i større afstande end svarende til ca. 3 gange skorstenshøjden, hænger sammen med lydudstrålingen i en retning på $5-20^\circ$ over skorstensåbningens plan - det vil sige i en vinkel på 70 til 85° med lodret (jo større afstand desto højere retning). For beregningspunkter i kortere afstand vælges tilsvarende lavere retninger, evt. retninger under åbningsplanet. Skønmæssigt kan der ved tættere beliggende beregningspunkter vælges en retning ca. 20° over sigtelinien til beregningspunktet.

Som parameter for retningsvirkningen bruges størrelsen $k \cdot a$, hvor a er radius af skorstensmundingen [m] og k er 2π divideret med bølgelængden af centerfrekvensen af det pågældende oktavbånd ved den relevante temperatur. Med god tilnærmelse gælder: $k = 0,016 \cdot f_c$ for varme afkast ($100-150^\circ\text{C}$) og $k = 0,018 \cdot f_c$ for "kolde" afkast, hvor f_c er centerfrekvensen i Hz.

Retningsvirkningen er vist for varme afkast i Tabel 5 og illustreret i Figur 6. Retningerne er anført i forhold til lodret. For kolde afkast (afkasttemperatur lavere end ca. 50°C) er retningsvirkningen i de relevante retninger 3 dB lavere.

ka	0,5	1	2	4	8	16	32	64	128
70°	4	3,5	3	3	3	3	2,5	2	2
80°	3	2	1	0,5	0	-0,5	-1	-2	-3
90°	2,5	1	-0,5	-1,5	-2,5	-3	-4	-5,5	-7
100°	2	0	-1	-2,5	-4	-5	-6	-8	-10
110°	1	-0,5	-2	-3,5	-5	-6,5	-8,5	-10	-12,5
120°	0,5	-1	-2,5	-4,5	-6,5	-8,5	-10,5	-12,5	-15

Tabel 5 Retningskorrektions ΔL_{ϕ} (i dB) for skorstene med afkasttemperatur i området $100-150^\circ\text{C}$.



Figur 6 Retningskorrektion ΔL_ϕ af skorstene i medvindsretningen for temperaturer i området 100-150°C.

5. EKSEMPEL PÅ BRUG AF MÅLEMETODEN

Metoden blev brugt til at måle kildestyrken af skorstenen på et affaldsforbrændingsanlæg. Skorstensrøret var 660 mm i diameter, og afstanden mellem prøvestudsen og munden var 67 m. Efter at sondemålingerne var foretaget, blev kildestyrken desuden målt på "sædvanlig" måde med kuglemetoden, måleafstand 1 m og mikrofon 15° over mundingsplanet. I tabellen nedenfor vises hovedresultaterne af beregningen af kildestyrken ud fra sondemålingen, og i sidste linie resultatet af kuglemålingen. For måletværsnittet er $10 \log S = -4,7 \text{ dB}$.

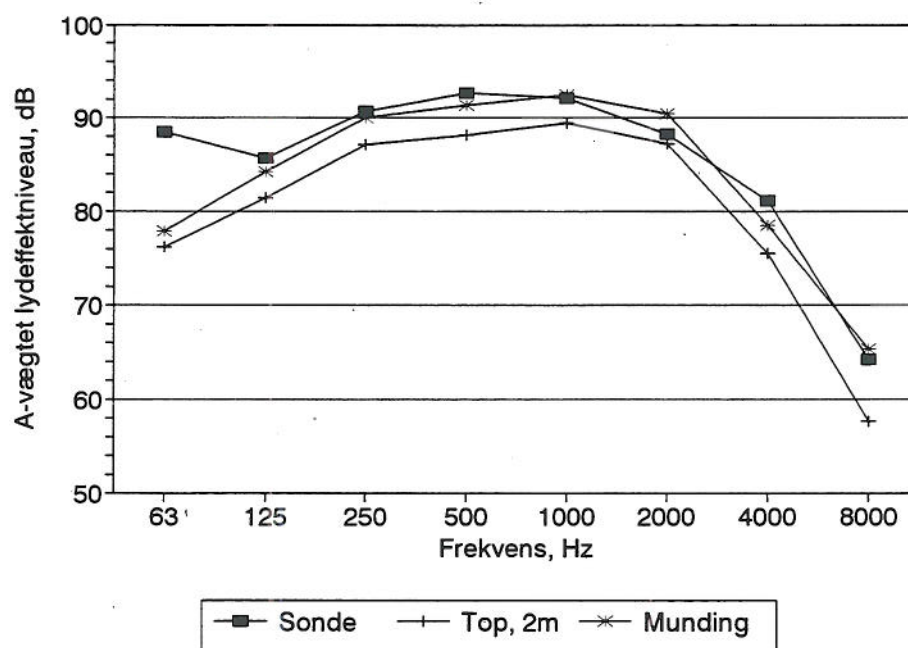
1/1-oktav, Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Lydtrykniveau i rør	97,2	97,3	103,0	101,3	95,3	90,3	81,5	67,9
Forventet baggr. (A-vægtet)	79	82	83	84	75	76	73	58
Dæmpning i rør	1,3	2,7	4,0	5,4	6,7	10,1	13,4	20,1
Retn.virkning 15°	4	4	3,5	3	3	3	3	2,5
Sondekorrektio	0	0,5	3	4,5	5,5	6,5	8,5	12,5
Kildestyrke sonde	92,2	91,5	97,9	95,9	89,5	81,7	72,1	55,4
Kildestyrke kugle	82,0	90,3	101,5	97,3	89,4	80,1	69,3	59,8

Tabel 6

Det målte lydtrykniveau og de to resultater for kildestyrken af skorstenen er alle A-vægtede. Der er ikke korrigeret for baggrundsstøjen, som er skønnet ud fra en forventet lufthastighed på omkring 15 m/s. Det ses at baggrundsstøjen sandsynligvis ikke har indflydelse på måleresultaterne af støjen i røret.

Ved beregningen af retningsvirkningen er parameteren ka for 63 Hz oktavbåndet = 0,33. Det ses, at der er en pæn overensstemmelse mellem de to resultater for kildestyrken. De totale A-vægtede kildestyrker er $L_{WA} = 101,5$ dB målt med sonde og 103,4 dB målt med kuglemetoden i toppen.

Endnu bedre overensstemmelse er illustreret med eksemplet i Figur 7. Det stammer fra målinger i et 70 m højt (koldt) afkast fra et trykkeri, hvor der blev målt både ved hjælp af sonden, med kuglemetoden i afstanden 2 m fra centrum af skorstenstoppen og ved måling direkte i skorstensmundingens plan (hvilket var muligt, fordi lufthastigheden ikke var ret høj). For den sidstnævnte kildestyrke er benyttet samme retningsvirkning som for sondemålingen.



Figur 7 Eksempel på kildestyrkemålinger i et 70 m højt afkast ved brug af sondemålinger, kuglemetoden og måling i afkastets åbning.

6. REFERENCER

- [1] Miljøstyrelsens vejledning nr. XX : "Beregning af ekstern støj fra virksomheder. Fælles nordisk beregningsmetode". Forventes udgivet i 1993.
- [2] Reinicke, W. og Danner, J.: "Schallabstrahlung von Schornsteinen - Messung und technische Möglichkeiten zu ihrer Minderung". Umweltbundesamt Forschungsbericht 105 03 301, Berlin, Januar 1982.
- [3] Jakobsen, J. m.fl.: "Støj fra skorstene. Metode til måling af skorstenes kildestyrke". Lydteknisk Institut rapport LI 930/91, Lyngby, december 1991.