

NILU  
TEKNISK NOTAT NR 15/80  
REFERANSE: 24079  
DATO: OKTOBER 1980

BEREGNING AV MINSTE SKORSTEINS-  
HØYDER VED AVFALLSFORBRENNING

AV  
YNGVAR GOTTAAS

NORSK INSTITUTT FOR LUFTFORSKNING  
POSTBOKS 130, 2001 LILLESTRØM  
NORGE

ISBN- 82-7247-198-1

FORORD

NILU har tidligere (juni 1980) kommentert et utkast fra SFT til regler for fastsettelse av skorsteinshøyder ved avfallsforbrenning. Det dreier seg om forskrifter for forbrenning av kommunalt avfall i anlegg med kapasitet under 5000 kg avfall pr time. Vedlegget til utkastet kan ha generell interesse, og gjøres derfor til Teknisk notat.

INNHOLDSFORTEGNELSE

	Side
FORORD .....	2
1 FLATT TERRENG UTEN BEBYGGELSE .....	4
2 SKORSTEINSTILLEGG FOR OMGIVENDE BEBYGGELSE .....	7
3 SKORSTEINSTILLEGG FOR TERRENG .....	8
3.1 Jevnt skrånende terreng og åsrygger .....	8
3.2 Enkeltstående ås (høyhus) .....	8
3.3 Daler og komplekst terreng .....	8
4 BYGNINGSEFFEKTER .....	9
5 REFERANSER .....	11

BEREGNING AV MINSTE SKORSTEINSHØYDER VED  
AVFALLSFORBRENNING

1 FLATT TERRENG UTEN BEBYGGELSE

Ved beregning av minste skorsteinshøyde er det vanlig å bruk spredningsparametre som gjelder for nær nøytral temperatur-sjikting (1), som observeres omkring 75% av tiden. Stabil sjikting reduserer maksimale bakkekonsentrasjoner. Instabil sjikting neglisjeres ofte i de retningslinjer som brukes ved enkle beregninger av minstehøyde.

Istedenfor å bruke en største tillatte bakkekonsentrasjon, er det ofte enklere å bruk en fortynningsfaktor,  $F = C_o/C_m$ , hvor  $C_m$  er største bakkekonsentrasjon og  $C_o$  konsentrasjonen i utslippet. Møll (2) angir representative konsentrasjoner til vurdering av søppelforbrenningsanlegg, tabell 1. Fra emisjonsstandarder og luftkvalitetsstandarder har Møll her justert times- og halvtimes-verdier til 10 min midlingstid.

Tabell 1: Utslipps-,  $C_o$ , og største tillatte bakkekonsentrasjoner,  $C_m$  ( $mg/m^3$ ) - søppelforbrenning.

Stoff	$C_o$	Land	$C_M$	$C_M$ -10 min	$F = C_o/C_M$
Støv	100-5000	Sverige	0.10-1h	0.15	670-330
HCl	500	Canada	0.05-30 min	0.060	8300
SO <sub>2</sub>	400	Sverige	0.36-30 "	0.41	980
NO <sub>x</sub>	400	Canada	0.36-1h	0.49	815
HF	10	Canada	0.007-1 d.	0.016	620
CO	53000	Canada	16.5-8h	32	1700

I de følgende beregninger er brukt Gaussisk spredningsformel og Singer og Smiths verdier for standardavvikene i et tverrsnitt av røykfanen (3).

Flere typer overhøydeformler er i bruk. Vi velger den versjon av Briggs som gir overhøyden som funksjon av avstanden (4).

Som representative utslippsparametre velges: gasstemperatur =  $200^{\circ}\text{C}$ , utetemperatur =  $10^{\circ}\text{C}$ , utslippshastighet =  $8\text{ m/s}$  og gassmengde =  $10\text{ m}_N^3/\text{s}$  (tilsvarende  $7000\text{ m}_N^3/\text{tonn}$  avfall og kapasitet  $5\text{ tonn/h}$ ). Så lenge vi bare er interessert i estimat av minste skorsteinshøyde,  $h_s$ , basert på maks. tillatte bakkekonsentrasjon, kan  $h_s$  uttrykkes ved (1)

$$h_s = k \frac{Q}{A \cdot C_m} = k \cdot \frac{N}{A} \cdot F, \quad \text{hvor } N \text{ er luftmengden}$$

For nøytral stabilitet er  $k = 11$  når  $Q$  er i  $\text{kg/h}$  og  $C_m$  i  $\text{mg/m}^3$ .  $k = 0.04$  når  $N$  er i  $\text{m}_N^3/\text{h}$ .  $A$  er en konstant som avhenger av varmeoverskudd og utslippshastighet. Med utslippsdata som angitt ovenfor blir  $A = 120\text{ m}^2/\text{s}$ .

En fortynningsfaktor  $F = C_o/C_m = 8300$  gir  $h_s = 28\text{ m}$ . Denne verdi for minste skorsteinshøyde passer meget vel overens med  $h_s = 30\text{ m}$ , beregnet av Møll (2).

Vindstyrken har en dobbelt effekt. Ved lavere vindhastighet øker konsentrasjonen, men samtidig øker overhøyde og dermed høyden av røykfanen over bakken. Maksimale bakkekonsentrasjoner inntreffer derfor ved en kritisk vindhastighet  $U_k = A/h_s$ , (1). Her blir  $U_k = 4\text{ m/s}$  og avstanden til maksimal konsentrasjon =  $650\text{ m}$ .

For å studere konsentrasjonsfordelingen i ulike avstander og høyder må vi nytte numeriske beregninger. Konsentrasjonsfordelinger i et vertikalsnitt gjennom skyaksen for forskjellige vindhastigheter og med skorsteinshøyde  $30\text{ m}$  er vist i figur 1.

Figur 2 viser effekten av å øke skorsteinshøyden fra 30 m til 50 m, samt hvordan høyden til maksimalkonsentrasjonen minsker med avstanden.

Figur 3 viser sammenhengen mellom høyden over bakken til fortynningsfaktor 8300, vindhastighet og avstand ved nøytral stabilitet.

Fortutsetter vi at konsentrasjonen i utslippet holdes konstant, men endrer utslippsmengden fra  $N$  til  $N^*$ , får vi for den nye skorsteinshøyde,  $h_s^*$ , idet  $A$  varierer med  $N^{0.75}$ .

$$h_s^* = h_s (N^*/N)^{0.25}$$

Tilsvarende får vi  $U_k^* = U_k (N/N^*)^{0.5}$

og  $X_m^* = X_m (N^*/N)^{0.3}$ .

En reduksjon av  $N$  til  $N/10$  gir da:

$$h_s^* = 0.6 h_s, \quad U_k^* = 3 U_k$$

og  $X_m^* = 0.5 X_m$

Figur 4 viser den vertikale fordeling av fortynningen under stabile forhold. Den kritiske vindhastighet blir meget lav og overhøyden så stor at tilfellet bare får betydning ved strømming over og rundt enkeltstående meget høye bygninger eller åser.

Ved ustabil sjikting øker overhøyden, mens økt turbulens gir større vertikal blanding. Vi vil ikke her gå inn på disse kompliserte forhold.

2 SKORSTEINSTILLEGG FOR OMGIVENDE BEBYGGELSE

Forholdet mellom konsentrasjonsfordeling, uttrykt ved nødvendig fortynningsfaktor, og krav til skorsteinstillegg for høyden B av omgivende bebyggelse er illustrert i figur 5.

Maksimalt skorsteinstillegg = B, er bare nødvendig i avstand L. For kortere avstander kan en teoretisk tillate høyere bebyggelse nærmere kilden. Tar vi imidlertid hensyn til at ustabil sjikting gir høyere bakkekonsentrasjoner på korte avstander, hvor også hvert enkelt hus er hyppigere utsatt, synes det rimelig å beholde kravet  $\Delta h = B$  også for avstander kortere enn L.

Figur 3 viser at kurvene for fortykning stiger fra den kritiske avstand med 1/200. Det vil si at kravet til tilleggshøyde kan reduseres med 5 m for hver 100 m utover kritisk avstand. Tar vi hensyn til at kritisk avstand avhenger av skorsteinshøyden, som igjen er bestemt av kapasiteten, får vi følgende tabell:

Anleggets kapasitet (kg/h)	Skorsteinstillegg, $\Delta h$ , for bebyggelse av høyde B (meter) innen avstand (meter).						
	100	200	300	400	500	600	700
Inntil 1000	B	B	B-5	B-10	B-15	0	0
1000-3000	B	B	B	B-5	B-10	B-15	0
3000-5000	B	B	B	B	B-5	B-10	B-15

Bebyggelsens høyde regnes fra midlere terrenghøyde hvor bebyggelsen står.

Det synes ikke rimelig å ta hensyn til bygningshøyden når avstanden blir større enn 700 m.



(I lengre avstander dekker husfasaden en mindre vinkel, og blir sjeldnere utsatt. Er  $F$  frekvensen av vindretning innen en bestemt 30 graders sektor, blir et hus med eksponert bredde,  $a$ , beliggende i avstand  $x$ , utsatt med hyppighet  $\approx 2 aF/X$ . For eksempel gir  $F = 15\%$  og  $a = 20$  m en hyppighet på  $1\%$  i avstand 600 m).

### 3 SKORSTEINSTILLEGG FOR TERRENG

#### 3.1 Jevnt skrånende terreng og åsrygger

Da luftstrømmen har tendens til å følge terrenget, er en høyere-liggende bebyggelse mindre utsatt enn en i første rekke er tilbøyelig til å anta. Teoretiske arbeider av Stümke for strømming over en langstrakt åsrygg ligger til grunn for de tyske regler (5). Tillegget er relativt beskjedent. Det enkleste vil være å forlange et konstant tillegg på 5 m.

#### 3.2 Enkelstående ås (høyhus)

Strømmen rundt en enkelt ås, eller enkeltstående høyhus, kan ikke lenger betraktes som 2-dimensjonal (som over en lang åsrygg). Ved at luftstrømmen strømmer såvel over som rundt hindringen kan den maksimale bakkekonsentrasjonen bli inntil den dobbelte av den tilsvarende i flatt terreng for samme avstand (6,7).

Ved stabil sjikting blir hindringer over ca 130 m meget utsatt. Jfr. figur 4. Utslipp nær høye enkelthindringer bør unngås i størst mulig grad. Skorsteinstillegget kan bli urimelig stort.

#### 3.3 Daler og komplekst terreng

Det vil være vanskelig å gi klare regler. Det enkleste er å forlange en tilleggshøyde på 5 m i jevnt skrånende terreng. Forøvrig vil terrenget avspeiles ved hyppigheten i observert vind opp/ ned dalen. Er avstanden til bebyggelse i dalsiden over 500 m blir forholdene noenlunde som med samme vindfordeling over flatt

terreng. Grovt sett kan en derfor se bort fra topografien ved mindre anlegg (under 3000 kg/h), med mindre det dreier seg om beliggenhet tett ved skrenter, ved enkeltstående åser med bebyggelse eller i en trang dal. I slike tilfelle bør en kreve nærmere vurderinger. Se forøvrig ref (1).

#### 4 BYGNINGSEFFEKTER

Figur 7 viser skjematisk skorsteinsutslipp i 3 ulike områder i en luftstrøm over en enkeltstående bygning (8). I tilfelle A har bygningen ingen eller liten effekt på luftstrømmen. En tommelfingerregel sier at skorsteinshøyden da må være  $2\frac{1}{2}$  ganger bygningshøyden. I tilfelle B føres røyken ned mot bakken, og i tilfelle C går utslippet direkte inn i levirvelen.

Forsøk i vindtunneler og teoretiske beregninger gir verdifulle holdepunkter, selv om forholdene er langt mer kompliserte enn skissert. For høye og slanke bygninger synes  $2\frac{1}{2}$  regelen unødig streng. I tilfelle B senkes røykfanen markert med avstanden, men økt turbulens bak bygningen gir økt spredning. Den vesentlige effekt blir at maksimumskonsentrasjonene bringes hurtigere ned mot bakken.

Et realistisk alternativ til  $2\frac{1}{2}$  regelen er  $h_s = h + 1.5D$ , hvor D er den minste verdi av bygningshøyde, h, og bredde av eksponert flate mot vinden (oftest en diagonal). Det gir tilbake  $2\frac{1}{2}$  regelen for en bred bygning, men reduserer kravet betraktelig for en høy og smal bygning.

Tar vi også med overhøydeeffekten kan kravet reduseres til

$$h_s = h + 1.5D - \alpha \cdot \Delta h, \quad \text{hvor } \alpha \text{ er en verdi mindre enn 1,} \\ \text{men trolig større enn 0.5.}$$

For  $A = 120 \text{ m}^2/\text{s}$  og  $u = 4 \text{ m/s}$  blir  $\Delta h = 30 \text{ m}$ .

En forutsetning er at utslippshastigheten,  $W$ , er tilstrekkelig stor til å unngå "downwash", dvs at plumen fanges opp i virvelen bak skorsteinen. Et vanlig krav er  $W \geq 1.5 U$ . Da 8 m/s er minste tillatte utslippshastighet, og hastigheten i de fleste tilfeller er større, vil downwash neppe bli særlig aktuelt.

Tilfelle C fører til en i middel jevn konsentrasjonsfordeling i virvelen. Middelkonsentrasjonen,  $\bar{C}$ , blir tilnærmet  $= K(\frac{Q}{S^2U})$ . Her er  $S$  representativ lengde (siden i en kubisk bygning). Konstanten,  $K$  har en verdi mellom 0.5 og 20. Vincent (9) gir et uttrykk for  $K$  som avhengig av bl.a. virvelens utstrekning. En 10 m x 30 m eksponert bygningsflate gir i 3 m/s vind en uttynningsfaktor på bare 1/10 av hva vi må kreve for vårt stipulerte utslipp. Tilfelle C bør/må derfor unngås.

En numerisk skorsteinshøyde på 5 m over tak synes imidlertid å være i de fleste tilfeller tilstrekkelig for disse typer anlegg.

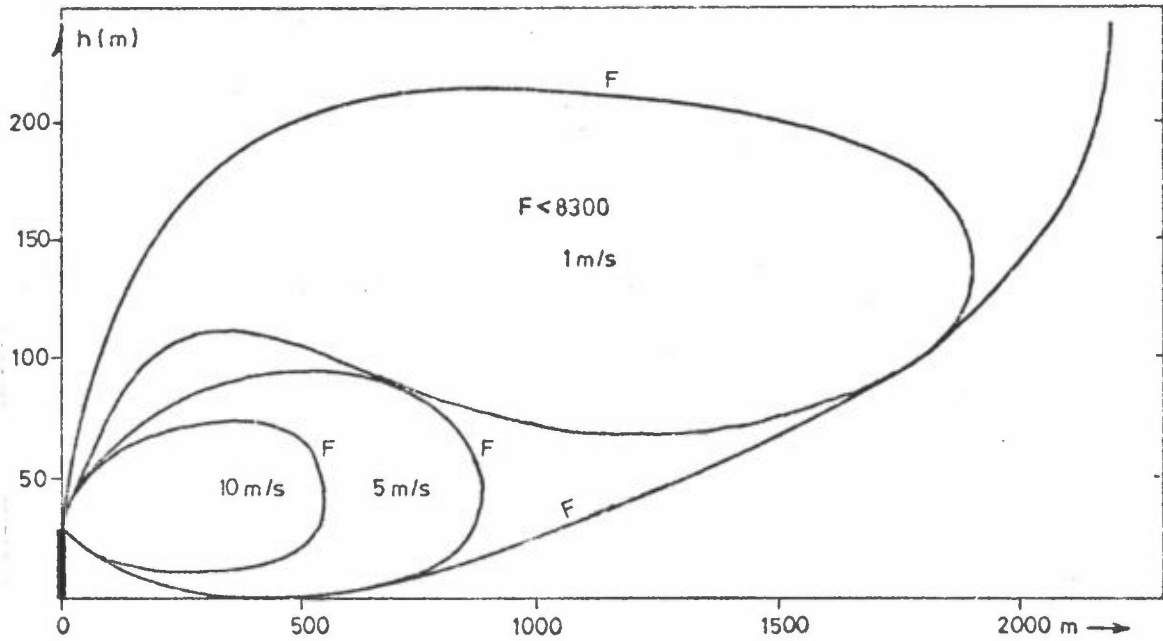
For å unngå nedsug i levirvelen bak bygningen skorsteinen står på kreves tilstrekkelig skorsteinshøyde over tak. For de typer anlegg det her er tale om synes 5 m tilstrekkelig.

For de fleste større utslipp (over 3000 kg/h) vil overhøyden være tilstrekkelig stor til at utslippet også blir upåvirket av luftstrømmen over bygningen. Dette er et krav det her neppe er nødvendig å sette, og det er derfor heller ikke nødvendig å innføre egne regler.

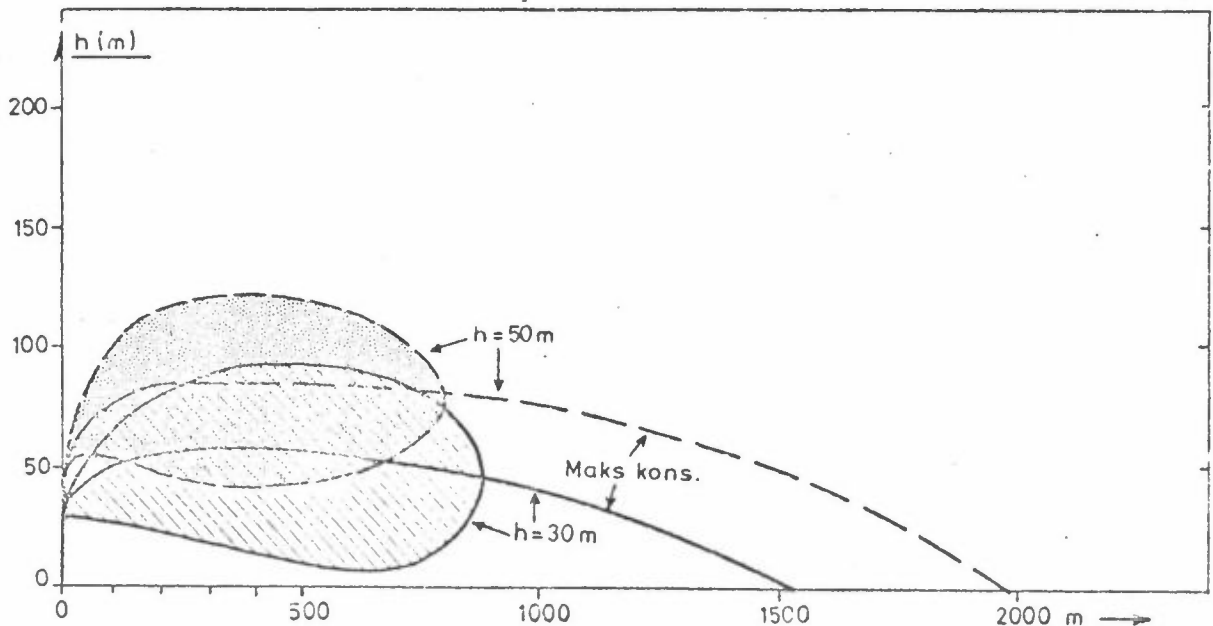
5 REFERANSER

- (1) Gotaas, Y. Regler og retningslinjer for fastsettelse av skorsteinshøyder. Lillestrøm 1974. (NILU OR 85/74.)
- (2) Møll, S. Sjøppelforbrenningsanlegg. Forslag til regler for fastsetting av skorsteinshøyder. Notat, SFT 1979.
- (3) Singer, F.A. Atmospheric dispersion at Brookhaven National Laboratory. *Int. J. Air and Water Poll.* 10, 125-135 (1966).
- (4) Høgstrøm, U. Dispersal models for sulfur oxides around chimneys and tall stacks. I: *Sulfur in the environment, part I*, edited by Nriagu, J.O. New York, Wiley, 1978, s. 141.
- (5) Ausbreitung luftfremder Stoffe in der Atmosphäre. Zusammenhang zwischen Emission und Immission. Schorsteinhöhen in ebenem, unbebauten Gelände. Düsseldorf 1963. (VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft. Band I. VDI 2289).
- (6) Hunt, J.C.R.  
Puttoch, J.S.  
Snyder, W.H. Turbulent diffusion from a point source in stratified and neutral flows around a three-dimensional hill - Part I. Diffusion equation analysis. *Atmos. Environ.* , 13, 1227-1239 (1979).
- (7) Snyder, W.H.  
Lawson, R.E. Determination of a necessary height for a stack close to a building - a wind tunnel study. *Atmos. Environ.* 10, 683-691 (1976).

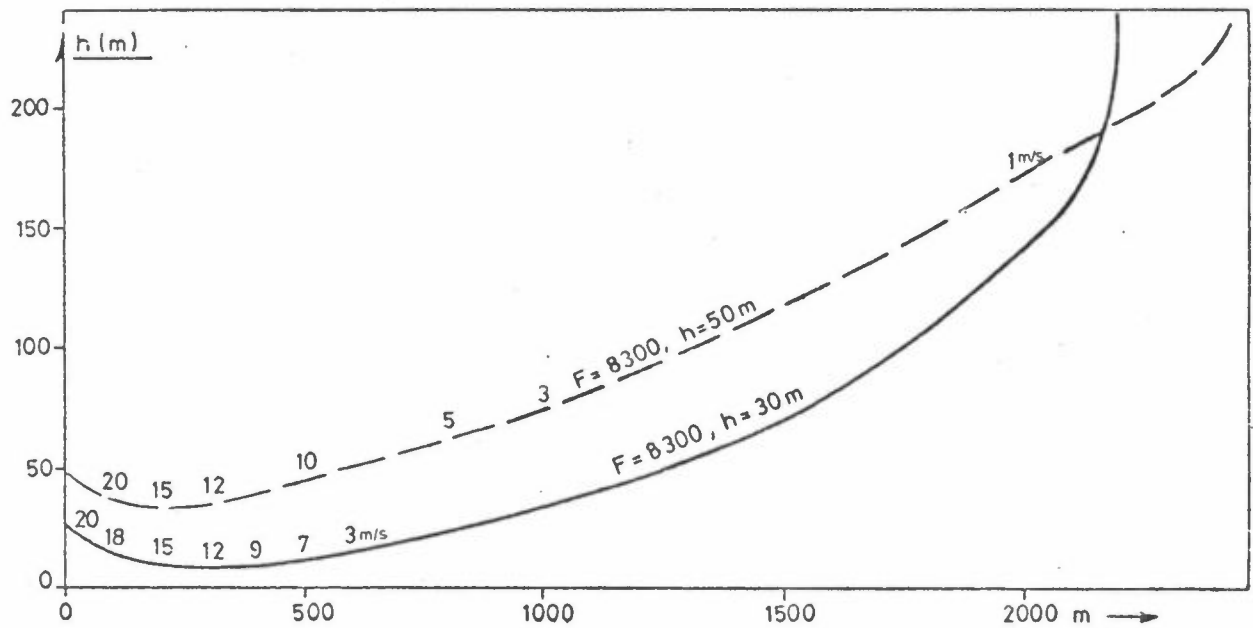
- (8) Lord, G.R.  
Baines, W.D.                      On the minimum height of roof-mounted chimneys. TP 6409 University of Toronto. Toronto 1964.
- (9) Vincent, J.H.                      Model experiments on the nature of air pollution transport near buildings.  
*Atmos. Environ.*, 11, 765-774 (1977).



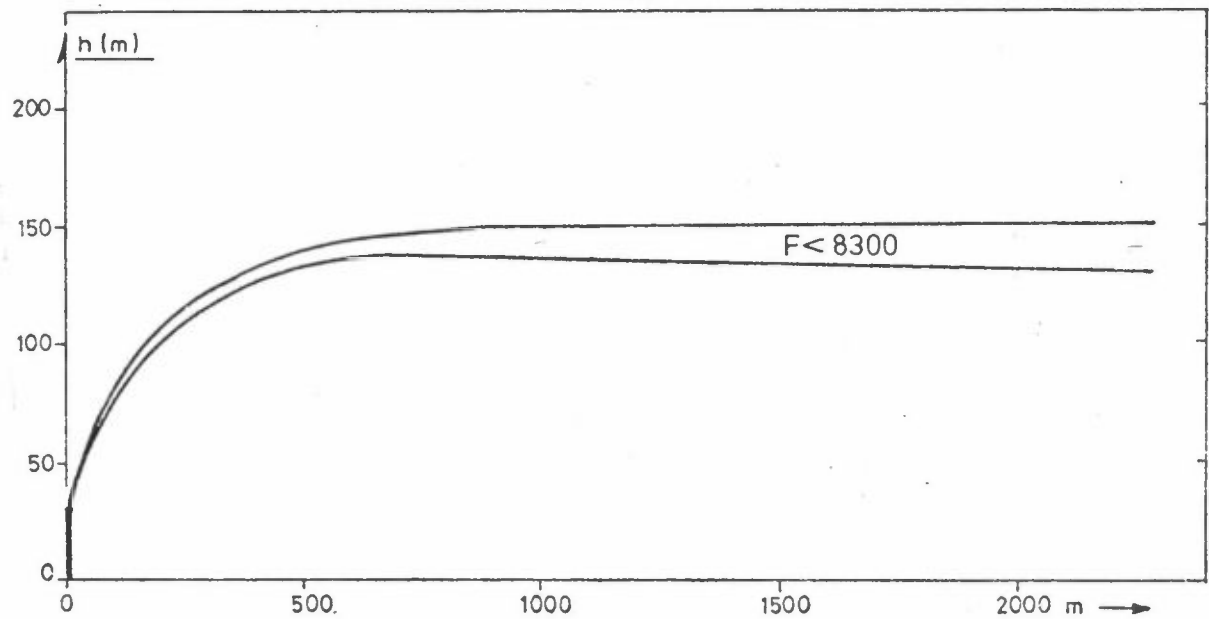
Figur 1: Vertikalsnitt gjennom skyaksen. Konsentrasjonsfordeling ved vindhastigheter 1 m/s, 5 m/s og 10 m/s. Fortynningsfaktor  $F = C_0/C = 8300$ .  
Utslipp =  $10^6 \text{ m}^3 \text{ N/s}$ , skorsteinshøyde = 30 m.  
 $A = 120 \text{ m}^2/\text{s}$ . Nøytral stabilitet.



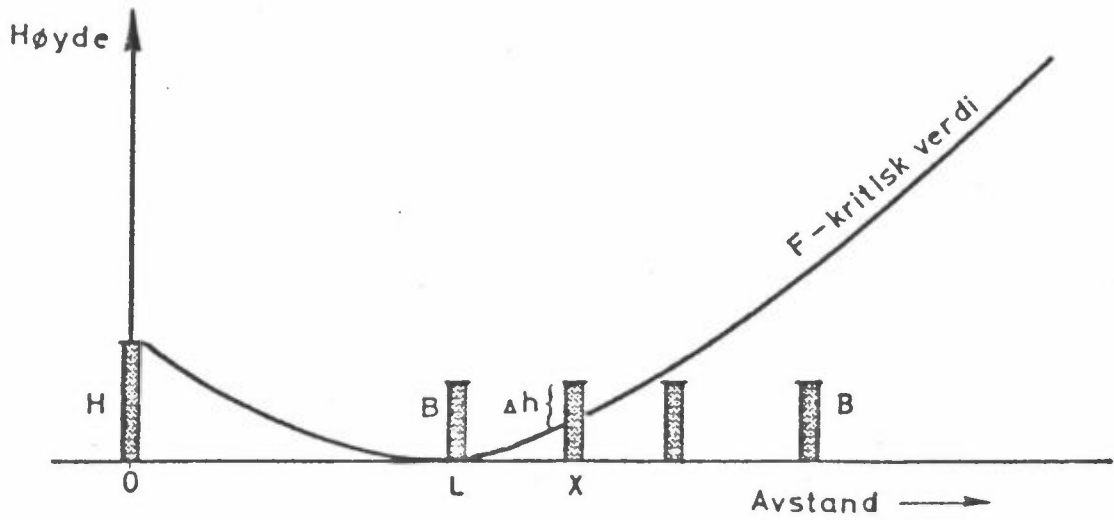
Figur 2: Vertikalsnitt. Høyde til maksimal konsentrasjon ved vindhastighet 5 m/s for skorsteinshøyde ( $h$ ) 30 m og 50 m. Øvrige data som i figur 1.



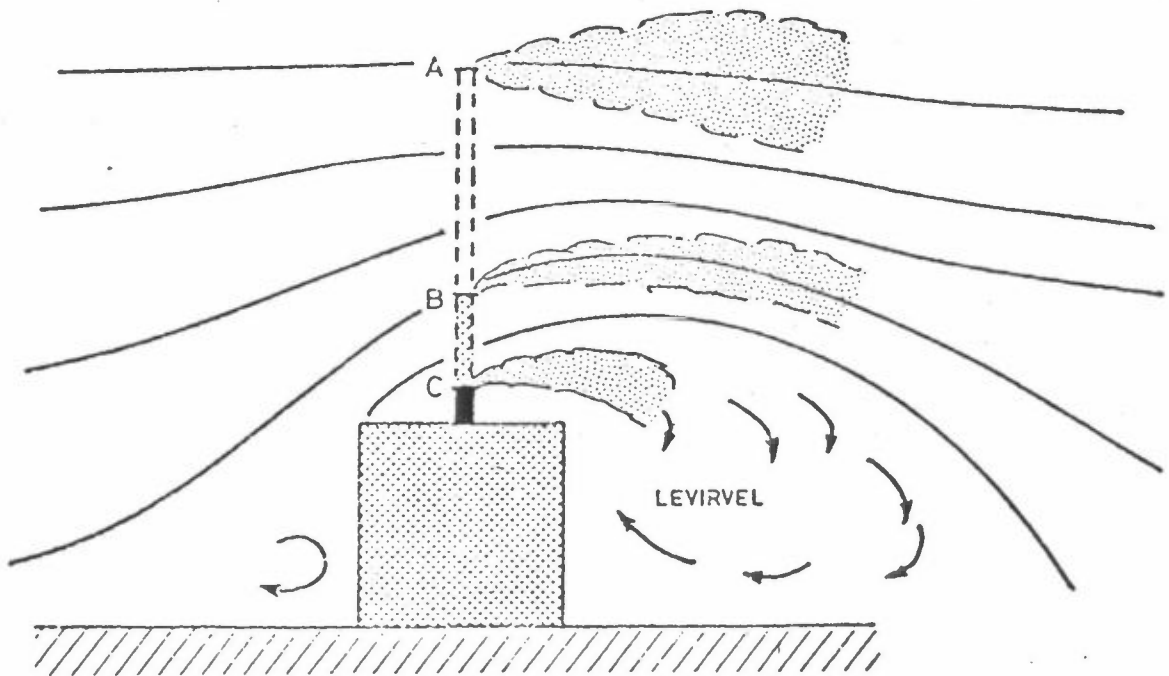
Figur 3: Høyde over banken til kritisk fortynningsfaktor (8300).  
Kritisk vindhastighet angitt. Øvrige data som i figur 1.



Figur 4: Vertikalsnitt ved stabil sjikting. Vindhastighet 1 m/s. Øvrige data som i figur 1.



Figur 5: Nødvendig tilleggshøyde,  $\Delta h$ , for bebyggelse av høyde  $B$ .



Figur 6: Luftstrøm over bygning.





# NORSK INSTITUTT FOR LUFTFORSKNING

TLF. (02) 71 41 70

(NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FORSKNINGSRÅD)  
POSTBOKS 130, 2001 LILLESTRØM  
ELVEGT. 52.

RAPPORTTYPE Teknisk notat	RAPPORTNR. TN 15/80	ISBN--82-7247-198-1
DATO OKTOBER 1980	ANSV.SIGN. B. Ottar	ANT.SIDER 15
TITTEL Beregning av minste skorsteinshøyder ved avfallsforbrenning.		PROSJEKTLEDER Y. Gotaas
FORFATTER(E) Yngvar Gotaas		NILU PROSJEKT NR 24079
		TILGJENGELIGHET ** A
OPPDRAGSGIVER NILU (SFT)		OPPDRAGSGIVERS REF.
3 STIKKORD (å maks.20 anslag) Skorsteinshøyde	Avfallsforbrenning	Bygningseffekter
REFERAT (maks. 300 anslag, 5-10 linjer)  Notatet er utarbeidet i forbindelse med at SFT utarbeider regler til fastsettelse av skorsteinshøyder ved avfallsforbrenning for anlegg med kapasitet under 5000 kg avfall pr time. Notatet viser hvordan en på en enkel måte kan fastsette minste skorsteinshøyde, samt skorsteinstillegg på grunn av bebyggelse.		
TITLE Minimum stack height for small furnaces for waste disposal		
ABSTRACT (max. 300 characters, 5-10 lines)  Simple methods are presented to determine minimum stack heights for incinerators with capacity less than 5000 kg waste per hour.		

\*\*Kategorier: Åpen - kan bestilles fra NILU           A  
Må bestilles gjennom oppdragsgiver       B  
Kan ikke utleveres                               C