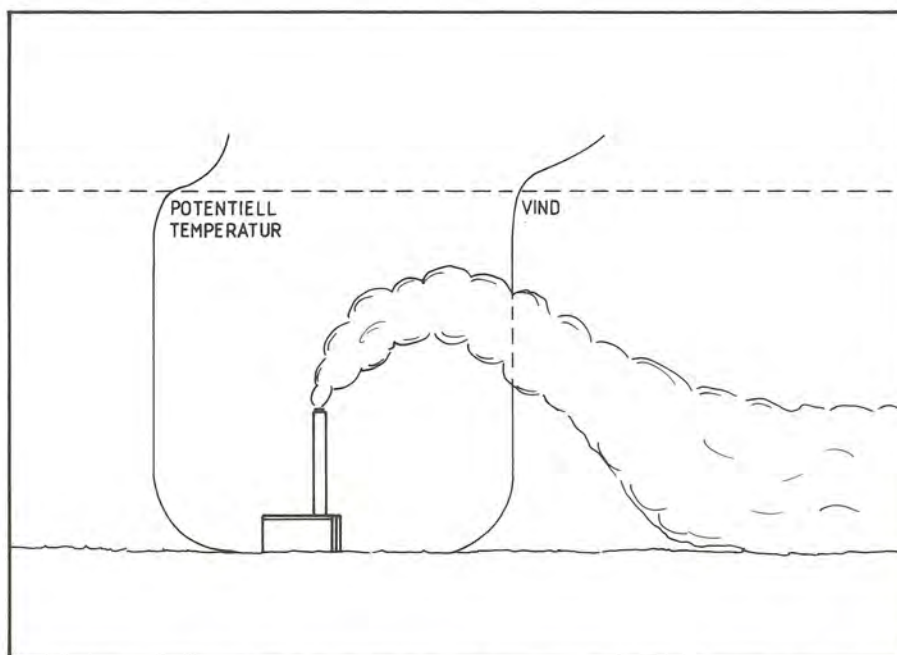




SPRIDNING AV LUFTFÖRORENINGAR FRÅN SKORSTENAR I KONVEKTIVA GRÄNSSKIKT

Av Gunnar Omstedt

SPRIDNING AV LUFTFÖRORENINGAR FRÅN
SKORSTENAR I KONVEKTIVA GRÄNSSKIKT

AIR POLLUTION DISPERSION FROM STACKS
IN CONVECTIVE BOUNDARY LAYERS

Av Gunnar Omstedt

Issuing Agency SMHI Box 923 S-601 19 NORRKÖPING SWEDEN	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="786 116 1091 197"> Report number RMK 37 </td> <td data-bbox="1091 116 1375 197"></td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="786 197 1375 277"> Report date December 1982 </td> </tr> </table>		Report number RMK 37		Report date December 1982	
Report number RMK 37						
Report date December 1982						
Author(s) Gunnar Omstedt						
Title (and Subtitle) SPRIDNING AV LUFTFÖRORENINGAR FRÅN SKORSTENAR I KONVEKTIVA GRÄNSSKIKT AIR POLLUTION DISPERSION FROM STACKS IN CONVECTIVE BOUNDARY LAYERS						
Abstract The purpose of this work is to formulate a reliable but simple model for dispersion calculations for stacks in convective boundary layers. Different formulations are discussed in the report. Based on this discussion the Gaussian model with plume rise formula according to Weil (1980) has been chosen. One main problem is to select dispersion parameters (σ_y, σ_z). A pragmatic view is taken. If a Gaussian model is used which dispersion parameters give the best agreement between measured and predicted ground level concentrations? Different formulas are tested against measured ground level SO₂ concentrations from power plants in the USA. The results show that the best agreement is obtained when the Brookhaven dispersion parameters are used, a result consistent with the work of Weil (1977, 1979a,b and 1980). Predicted ground level concentrations were within a factor of two of measured concentrations in 14 cases of 15. Predicted ground level concentrations, using theoretically estimated dispersion parameters (Lamb, 1981), gave too low concentrations in 8 of 12 cases. A more realistic formulation including self-induced spread of the buoyant plume did not improve the result to any significant degree. This indicates that the descent of the plume centerline, known to occur in convective conditions, must be taken into account when using theoretically estimated dispersion parameters. Comparison has also been made between measured and predicted ground level concentrations of two different operational dispersion models used at the SMHI. The results show that these models need to be improved.						
Key words Dispersion Stack Convective boundary layer Air pollution						
Supplementary notes	Number of pages 18	Language Swedish with an abstract in English				
ISSN and title 0347-2116 SMHI Reports Meteorology and Climatology						
Report available from: Liber Grafiska AB/Förlagsorder S-162 89 STOCKHOLM SWEDEN						

FÖRORD

Denna rapport ingår som en del i ett arbete som syftar till att förbättra SMHI:s spridningsmodeller. Projektet har bekostats av AB Svarthålsforsen, Statens Vattenfallsverk, Sydkraft och SMHI.

Värdefulla synpunkter har lämnats av docent Björn Bringfelt. Jämförelse mellan beräkningsresultat från SMHI:s spridningsmodeller och mätdata har utförts av Gunnar Orrskog och Christina Lindgren.

NOMENKLATUR

a_1	Spridningskoefficient (ekvation 7)
a_2	" "
b_1, b_2	Dimensionslösa exponenter (ekvation 7)
$c(x, y, z)$	Halten av SO_2 i ppb (v) eller $\mu g/m^3$. Sorterna kan omvandlas genom följande uttryck c (ppb) = c ($\mu g/m^3$) $\cdot$ 0.38
c_{ber}	Beräknad markkoncentration av SO_2 (ppb(v))
$c_{mätt}$	Mätt markkoncentration av SO_2 (ppb(v))
f	Coriolisparametern
F	Värmefflöde $F = \frac{V_i \rho}{\pi} \left(\frac{T_i - T_o}{T_i} \right)$ (m^4/s^3)
g	Gravitationsacceleration (m/s^2)
H	Effektiv skorstenshöjd (m)
h_i	Blandningsskiktets höjd (m)
h_i'	$h_i' = h_i - h_s$
h_s	Fysisk skorstenshöjd (m)
H_o	Flöde av sensibelt värme från markytan ($watt/m^2$)
k	von Karmans konstant
L	Monin - Obukhovs längdskala $L = - \frac{u_*^3 T}{g k (\overline{w'\theta'})_o}$
P	Del av plym som penetrerar in i det stabila luftskiktet ovanför gränsskiktet (ekvation 6, dimensionslös)
Q	SO_2 utsläpp (g/s)
r	plymradie (m)
R	Korrelationskoefficient
s	Stabilitetsparameter $s = \left(\frac{g}{\theta_a} \frac{d\theta_a}{dz} \right)$, där $\frac{d\theta_a}{dz}$ anger potentiella temperaturgradienten ovanför gränsskiktet
T	Temperatur (K)
T_i	Rökgastemperatur vid skorstensmynning (K)
T_o	Medeltemperatur i gränsskiktet (K)
u	Vindhastighet (m/s)
u_*	Friktionshastighet (m/s)
V_i	Rökgasvolym vid skorstensmynning (m^3/s)
w_d	Medelhastighet på "downdraft" i ett konvektivt gränsskikt (m/s)
w_*	Konvektiva hastighetsskalan, ekvation (8) (m/s)
$\overline{(w'\theta')}_o$	$\overline{(w'\theta')}_o = H_o / \rho_i C_p$
x	Avstånd från skorsten (m)
x_f	Avstånd från skorsten till slutligt plymlyft (m)
X	Avstånd från skorsten (ekvation 11, dimensionslös)
X_f	Avstånd från skorsten till slutligt plymlyft (ekvation 16, dimensionslös)
z	Höjd över mark (m)
z'	Plymstigning ovanför skorstenshöjden h_s (ekvation 14)
z_a	Höjd till anemometer (m)
β_y	Ekvation (13)
β_z	Ekvation (16)
Δh	Slutligt plymlyft (m)
σ_y	Standardavvikelsen av haltfördelningen i y-led tvärs plymen (m)
σ_z	Standardavvikelsen av haltfördelningen i z-led tvärs plymen (m)

I N N E H Å L L S F Ö R T E C K N I G

	Sida
1. INLEDNING	1
2. DEN GAUSSISKA MODELLEN	1
3. ANDRA ENKLA MODELLER	3
4. BESTÄMNING AV SPRIDNINGSPARAMETRARNA σ_y OCH σ_z	3
4.1 <u>Empiriska metoder</u>	3
4.2 <u>Teoretiska metoder</u>	5
4.2.1 Plymens egenspridning	7
4.3 <u>Kombination av empiriska och teoretiska metoder</u>	10
5. MÄTANLÄGGNINGAR OCH MÄTDATA	10
6. JÄMFÖRELSE AV MODELLRESULTAT MED MÄTDATA	12
7. SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER	16
8. REFERENSER	17

1. INLEDNING

De högsta föroreningshalterna vid marken från skorstensutsläpp inträffar vanligtvis vid konvektiva instabila meteorologiska förhållanden. Halterna kan bli speciellt höga vid svag vind och låg blandningshöjd förutsatt att plymen inte penetrerar in i det stabila luftskiktet ovanför blandningsskiktet. Avsikten med denna rapport är att jämföra modeller för beräkning av markhalter vid sådana väderförhållanden. Rapporten ingår som en del i ett arbete för att förbättra SMHIs spridningsmodeller. En utgångspunkt för rapporten är den Gaussiska spridningsmodellen, som är relativt väl testad mot mätdata i atmosfären. Ofullständigheter i denna modell har diskuterats av Deardorff och Willis (1975) och Lamb (1981). Vi har här valt en praktisk infallsvinkel: Om den Gaussiska modellen används vilka värden på spridningsparametrarna skall då väljas för att få bäst överenskommelse mellan beräknade och uppmätta halter? Olika formuleringar har här prövats mot mätta SO_2 -halter.

2. DEN GAUSSISKA MODELLEN

Den modell som oftast utnyttjas vid spridningsberäkningar av föroreningsutsläpp från skorstenar är den så kallade Gaussiska modellen. Nyckelparametrar för modellen är, förutom emissionsdata och vindhastighet, effektiva skorstenshöjden (H) och standardavvikelserna i y - och z -led av haltfördelningen tvärs plymen (σ_y och σ_z). Modellen skrivs för konvektiva meteorologiska förhållanden på följande sätt:

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{u} \frac{g_1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y} \frac{g_2}{\sqrt{2\pi} \sigma_z} \quad (1)$$

$$\text{där } g_1 = \exp(-0.5 y^2 / \sigma_y^2) \text{ och } g_2 = \sum_{N=-\infty}^{\infty} \{ \exp[-0.5 (z-H+2Nh_i)^2 / \sigma_z^2] + \exp[-0.5 (z+H+2Nh_i)^2 / \sigma_z^2] \}$$

Den oändliga serien konvergerar snabbt. Beräkningar där N varierar från -4 till +4 är vanligtvis tillräcklig.

När plymen är väl blandad under inversionen, h_i , reduceras ekvation (1) till

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{u} \frac{g_1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y} \frac{1}{h_i} \quad (2)$$

vilket inträffar för alla värden på z mellan marken och h_i då $\sigma_z \geq 1.6 h_i$ eller för $z = 0$ då $\sigma_z \geq 0.8 h_i$ (Turner, 1980).

Den effektiva skorstenshöjden, H, beräknas som summan av skorstenshöjden, h_s , och plymlyftet, Δh . Plymlyft beräknas här i enlighet med Weil (1980) genom att bestämma det lägsta lyftet enligt följande tre formler.

1. Briggs' (1975) "break-up" modell för konvektiva förhållanden

$$\Delta h = 4.3 \left(\frac{F}{u} \right)^{3/5} \frac{h_i^{2/5}}{w_*^{6/5}} \quad (3)$$

där H i Briggs' ekvation (86) ersatts av $\frac{w_*^3}{h_i}$

2. Briggs' (1975) "touch-down" modell (ekvation 91) för konvektiva förhållanden

$$\Delta h = 1.0 \left(\frac{F}{u w_d^2} \right) \cdot \left(1 + \frac{2h_s}{\Delta h} \right)^2 \quad (4)$$

Ekvationen löses iterativt med $w_d = 0.4 w_*$ i enlighet med Briggs. I ekvation (4) antas att plymlyftet sker relativt till luften i ett downdraft.

3. Weils (1979 b) formel för en plym "infångad" i ett konvektivt gränsskikt

$$\Delta h = 0.62 (h_i - h_s) \quad (5)$$

Ett kriterium av Briggs (diskuterat i Weil (1980)) har utnyttjats för att beräkna hur stor del av plymen som penetrerar in i det stabila luftskiktet ovanför det konvektiva gränsskiktet på g a plymens värmeinnehåll. Antag botten av plymen vid 1.3, centrumlinjen vid 2.6 och toppen vid $3.9 \cdot \left(\frac{F}{u \cdot s} \right)^{1/3}$. Låt P beteckna delen av plymen ovanför gränsskiktet, h_i , och sätt $h_i' = h_i - h_s$.

P skrivs då på följande sätt:

$$P = 1.5 - \frac{h_i'}{2.6 \left(\frac{F}{u \cdot s} \right)^{1/3}} \quad (6)$$

där $s = \left(\frac{g}{\theta} \frac{d\theta}{dz} \right)_a$ och $\frac{d\theta}{dz}_a$ anger potentiella temperaturgradienten ovanför h_i' .

$s = 0$ under h_i' . Kriteriet innebär att

$$P = 0.5 \text{ då } h_i' = 2.6 \left(\frac{F}{u \cdot s} \right)^{1/3}$$

$$P = 0 \text{ då } h_i' > 3.9 \left(\frac{F}{u \cdot s} \right)^{1/3}$$

$$P = 1 \text{ då } h_i' < 1.3 \left(\frac{F}{u \cdot s} \right)^{1/3}$$

Hänsyn till penetrationen görs, vid beräkning av markhalter, genom att multiplicera emissionen Q med faktorn $(1-P)$. I de i tabell 5 beräknade markhalterna är penetrationsfaktorn noll för alla fall utom fall 8 (kraftenhet 1) där $P=0.4$.

3. ANDRA ENKLA MODELLER

Lamb (1979) har publicerat en enkel spridningsmodell för värmepassiva utsläpp där resultat från spridningsberäkningar med en avancerad numerisk turbulensmodell parametriserats i form av en Gaussisk spridningsekvation med sjunkande plymaxel. Modellen ger emellertid för höga markhalter (Lamb, 1981). Venkatram (1980) har utvecklat en enkel spridningsmodell som inkorporerar de principiella resultaten från studierna av Deardorff, Willis och Lamb. Modellen har testats mot mätdata med gott resultat. Nära källan underskattar emellertid modellen halterna. En enkel modifiering av Venkatrams modell ger bättre resultat. Resultatet är emellertid inte bättre än, utan endast jämförbart med, resultat från beräkningar med den Gaussiska spridningsmodell som beskrivits ovan (Weil, 1980).

4. BESTÄMNING AV SPRIDNINGSPARAMETRARNA σ_y OCH σ_z

Ett huvudproblem vid spridningsberäkningar är att välja värden på spridningsparametrarna. Det finns ett flertal olika empiriska och teoretiska metoder med betydande skillnader som resultat.

4.1 Empiriska metoder

Weil (1977, 1979a,b och 1980) har studerat olika empiriska metoder genom att pröva dessa med hjälp av en Gaussisk spridningsmodell mot föroreningsdata från olika anläggningar i USA. Bäst resultat, mellan beräknade och uppmätta markhalter, erhöles med spridningsparametrar från Brookhaven National Laboratory (BNL) valda enligt Weil's algoritm.

Dessa kan skrivas på följande sätt:

$$\begin{aligned}\sigma_y &= a_1 x^{b_1} \\ \sigma_z &= a_2 x^{b_2}\end{aligned}\tag{7}$$

där x anger avståndet från källan. Värdena på $a_1, a_2 \dots$ ges i tabell 1 och baserar sig på mätningar av medelhalter (under ca 1 timme) av utsläpp från en värme-passiv källa på 108 m höjd (Singer and Smith, 1966).

Tabell 1. Spridningskoefficienter enligt BNL.

Dispersion coefficients according to BNL.

Stabilitets- klass	a_1	b_1	a_2	b_2
B2	0.40	0.91	0.41	0.91
B1	0.36	0.86	0.33	0.86

För att bestämma stabilitetsklass utnyttjar Weil ett enkelt tillvägagångssätt, se tabell 2.

Tabell 2 Weil's (1977) algoritm för val av BNL stabilitetsklass.

Weil's (1977) algorithm for selecting Brookhaven stability classes.

Stabilitets- klass	Medelvindhastighet (m/s)
B2	0-5
B1	>5

Vindhastigheten avser medelvindhastigheten i gränsskiktet. Medelpotentiella temperaturgradienten i gränsskiktet måste vara mindre än eller lika med 0.003 Km^{-1} .

4.2 Teoretiska metoder

De karakteristiska parametrarna i ett homogent, stationärt konvektivt gränsskikt utgörs av friktionshastigheten u_* , det sensibla värmeflödet H_0 , coriolisparametern f och gränsskiktets höjd h_i . Vid kraftig konvektion, då $-h_i/L > 10$ där L anger Monin-Obukhovs längdskala, är den turbulenta strukturen ovanför $0.1 h_i$ oberoende av u_* . Den karakteristiska hastighetsskalan utgörs då av den konvektiva hastighetsskalan

$$w_* = \left[\frac{g}{T_0} h_i \overline{(w'\theta')_0} \right]^{1/3} \quad (8)$$

Den konvektiva tidsskalan h_i/w_* är vid dessa förhållanden mycket mindre än f^{-1} , varför coriolisparametern kan försummas. Skalningsparametrarna för det konvektiva gränsskiktet utgörs därför av w_* och h_i . Detta kallas hypotesen om konvektiv similaritet. Deardorff och Willis (1975) har visat genom tankexperiment att spridningen av värmepassiva ämnen i det konvektiva gränsskiktet följer konvektiv similaritet. Resultaten har bekräftats av Lamb (1981) genom spridningsberäkningar av värmepassiva partiklar med hjälp av en numerisk turbulensmodell. Resultaten från dessa beräkningar kan, för upphöjda punktkällor, relativt väl sammanfattas i följande formler (se även figur 2 och 3).

$$\sigma_y/h_i = \begin{cases} 1/3 X, & X \leq 1 \\ 1/3 X^{2/3}, & 1 < X \leq 3 \end{cases} \quad \text{för } H > 0.1 h_i \quad (9)$$

och

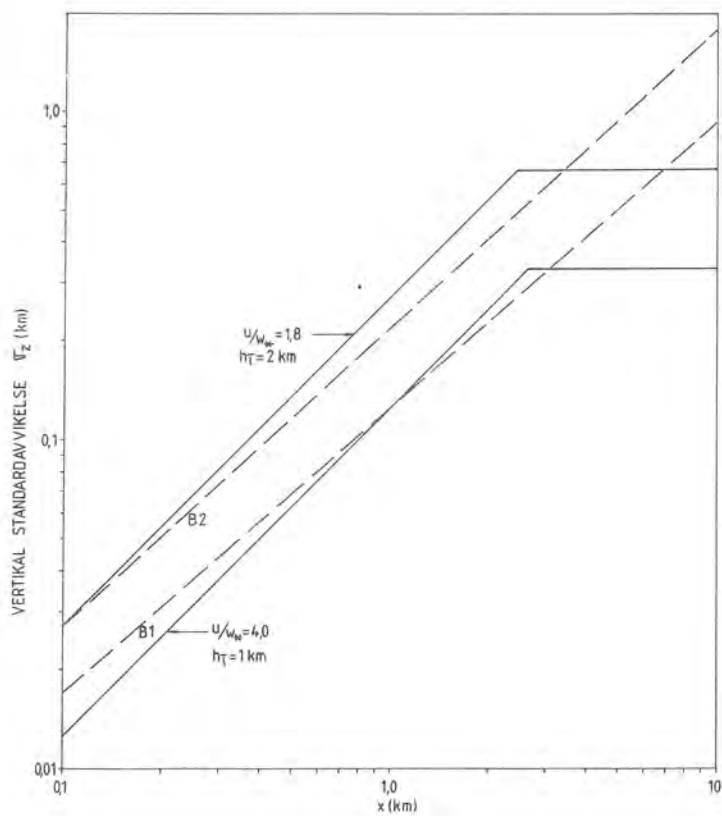
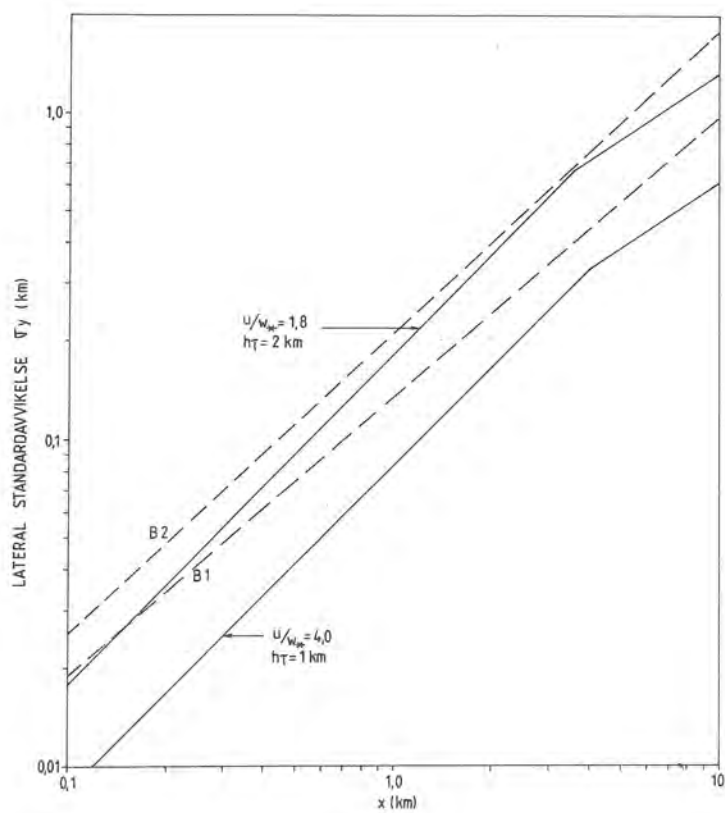
$$\sigma_z/h_i = \begin{cases} 1/2 X, & X \leq 2/3 \\ 1/3, & X > 2/3 \end{cases} \quad \text{för } H > 0.1 h_i \quad (10)$$

$$\text{där } X = \frac{w_* \cdot x}{u_* h_i} \quad (11)$$

Ekvation (9) och (10) gäller då $1.2 w_* \leq u \leq 6.0 w_*$. Den undre gränsen innebär att diffusionen i vindens riktning kan försummas medan den övre gränsen innebär att huvuddelen av gränsskiktet är dominerat av konvektiv turbulens.

I figur 1 jämförs empiriskt bestämda σ_y - och σ_z -värden från BNL med teoretiskt bestämda enligt Lamb. I figuren framgår att σ_y -värden från BNL är större än de teoretiskt bestämda. För σ_z är överensstämmelsen relativt god nära källan, då $X \leq 1$ (ekv 11). På större avstånd är σ_z -värdena från BNL större än de teoretiskt bestämda.

Figur 1. Jämförelse mellan empiriskt bestämda spridningsparametrar enligt BNL (streckade) och teoretiskt beräknade enligt Lamb (1981) (heldragna).
Comparison between dispersion coefficients according to BNL (dashed) and Lamb (1981) (Full lines).



4.2.1 Plymens egen spridning

Lambs spridningsresultat avser värmepassiva utsläpp. De flesta utsläpp innehåller emellertid värme som orsakar en egenspridning hos plymen. Låt $\sigma_{e,y}$ beteckna haltfördelningens standardavvikelse i y-led orsakad av plymens egenspridning och $\sigma_{a,y}$ betecknar haltfördelningens standardavvikelse i y-led orsakad av atmosfärens turbulens. Den totala standardavvikelsen ges då utav:

$$\sigma_y = (\sigma_{e,y}^2 + \sigma_{a,y}^2)^{1/2} \quad (12)$$

Vid konvektiva förhållanden beskriver $\sigma_{a,y}$ meandringen av den instantana plymens centrumlinje runt dess tidsmedelvärde position. Tillväxten av plymen orsakad av egenspridningen kan beräknas genom följande antagande

$$\sigma_{e,y} = \beta_y \cdot z' \quad (13)$$

där z' anger plymens stigning ovanför skorstenen. Denna kan beräknas med hjälp av Briggs' s k 2/3-dels lag:

$$z' = 1.6 \frac{F}{u}^{1/3} x^{2/3} \quad (14)$$

Ekvation 14 gäller till det slutliga plymlyftet är nått. Därefter antas att $\sigma_{e,y} = \beta_y \cdot \Delta h$ där Δh anger det slutliga plymlyftet.

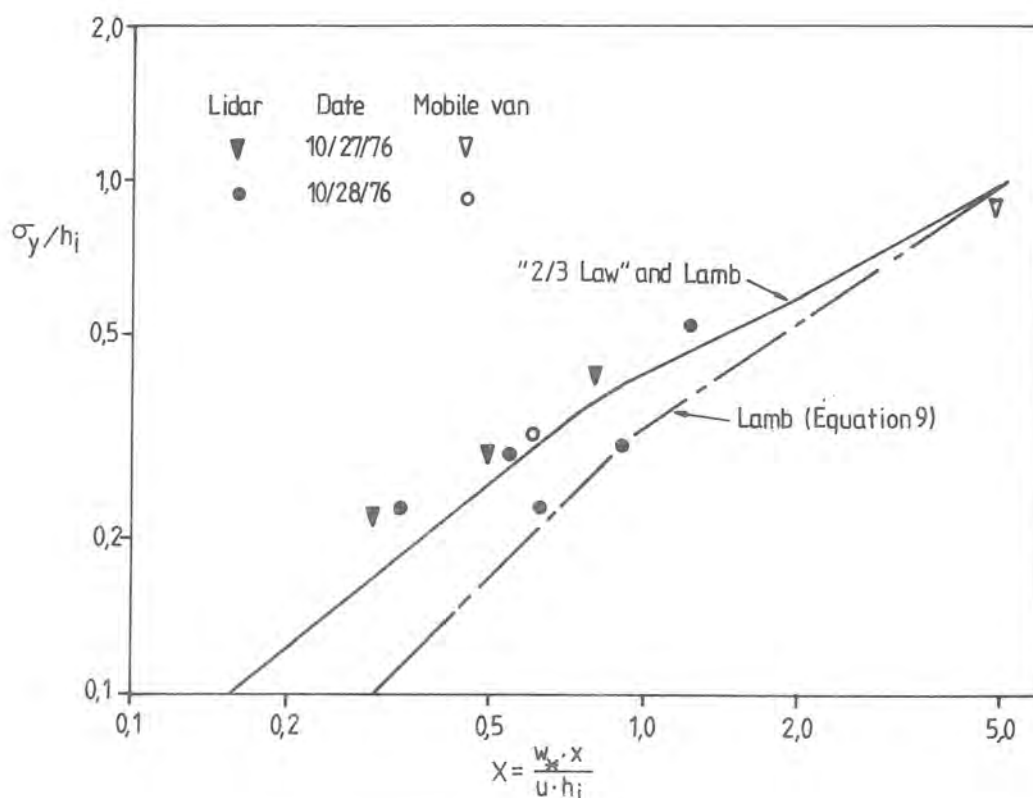
Weil (1979b) har, i enlighet med ovanstående resonemang, föreslagit följande uttryck för σ_y :

$$\frac{\sigma_y}{h_i} = \begin{cases} \left[2.6 \beta_y^2 \left(\frac{F}{u w_*^2 h_i} \right)^{2/3} x^{4/3} + 1/9 x^2 \right]^{1/2} & \text{för } x \leq 1 \\ \left[2.6 \beta_y^2 \left(\frac{F}{u w_*^2 h_i} \right)^{2/3} x^{4/3} + 1/9 x^{4/3} \right]^{1/2} & 1 < x \leq 3 \end{cases} \quad (15)$$

Den andra termen i (15), som beskriver plymens tillväxt orsakad av atmosfärens turbulens, ges av ekvation (9). Relativt gott resultat har erhållits mellan mätta och på detta sätt beräknade σ_y/h_i -värden (Weil, 1979b och Heidorn, 1981). Resultatet framgår av figur 2.

Figur 2. Jämförelse mellan mätta och beräknade σ_y/h_i -värden som funktion av det dimensionslösa avståndet från källan (Weil, 1979b).

Comparison between measured and calculated values of σ_y/h_i as a function of nondimensional downwind distance (Weil, 1979b).



Standardavvikelsen i z-led, σ_z , följde vid Weils (1979b) mätningar relativt väl Briggs' 2/3-dels lag till det slutliga plymlyftet var nått. Därefter antas att plymen sprids som ett värmepassivt ämne i enlighet med Lamb (1981). Följande formler föreslås (Weil, 1979b):

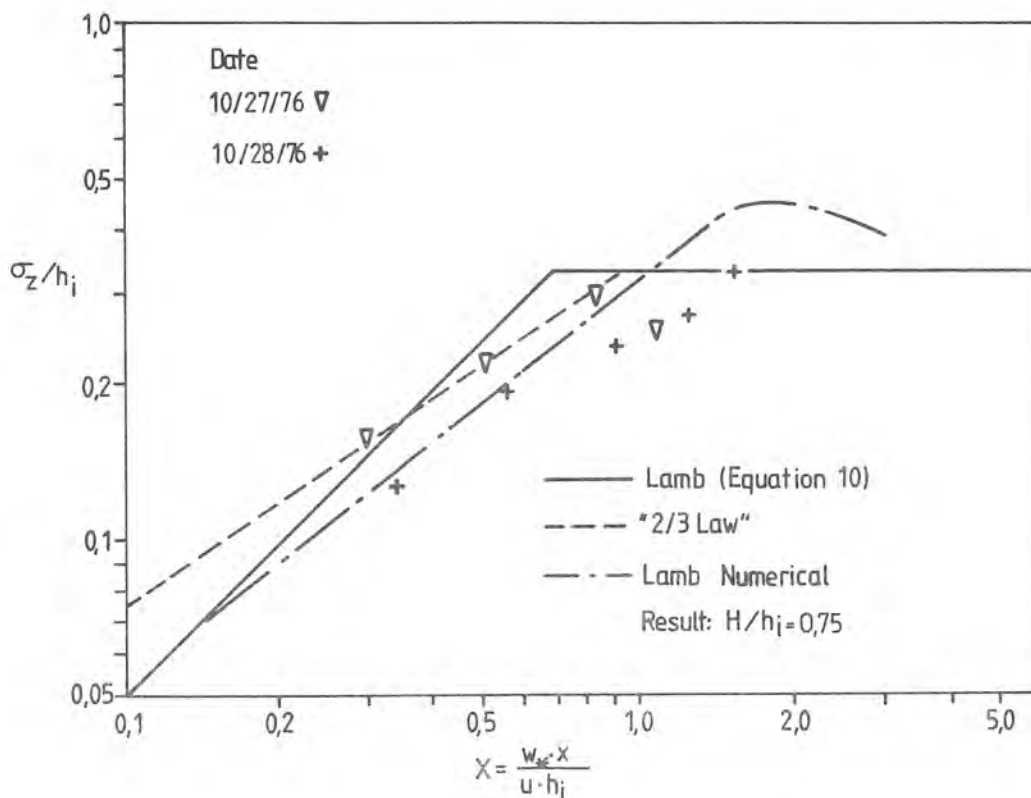
$$\frac{\sigma_z}{h_i} = \begin{cases} \frac{1.6}{h_i} \beta_z \left(\frac{F}{u}\right)^{1/3} \left(\frac{h_i}{w_*}\right)^{2/3} X^{2/3} & \text{för } X \leq X_f \text{ där } X_f = \frac{w_*}{u} \frac{x_f}{h_i} \\ \frac{\sigma_{zf}}{h_i} \left(\frac{X}{X_f}\right)^\gamma & \text{för } X > X_f \\ \frac{1}{h_i} \left(\frac{1}{3} h_i^2 - H \cdot h_i + H^2\right)^{1/2} & \text{då plymen är väl blandad i z-led} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{där } \gamma = 0.77 \text{ då } H \geq 0.63 h_i \\ \text{och } \gamma = 1.0 \text{ då } H < 0.63 h_i \end{array} \quad (16)$$

Beräkningar har utförts med $\beta_z = 0.62$ (se figur 3).

Ingen hänsyn har här tagits till den vertikala meandringen av plymen vilket inte heller var nödvändigt då mätningarna gjordes under en period med stark vind och svag konvektion. Typiskt u/w_* värde under mätperioden var 4.0.

Figur 3. Jämförelse mellan mätta och beräknade σ_z/h_i värden som funktion av dimensionslöst avstånd från källan (Weil, 1979b).

Comparison between measured and calculated values of σ_z/h_i as a function of non dimensional downwind distance.



Under starka konvektiva förhållanden då u/w_* är mindre än eller lika med säg 2.0 sker vertikal meandring av plymen. För att ta hänsyn till denna effekt utnyttjar vi Lams resultat för spridningen av värmepassiva utsläpp. Spridningsparametern i z-led σ_z skrivs då på följande sätt

$$\frac{\sigma_z}{h_i} = \begin{cases} \left[2.6 \beta_z^2 \left(\frac{F}{u w_*^2 h_i} \right)^{2/3} X^{4/3} + 1/4 X^2 \right]^{1/2} & \text{för } X \leq 2/3 \text{ eller} \\ \text{tills maximala värdet uppnås, som ges av} & \\ 1/3 & \end{cases} \quad (17)$$

Egenspridningens storlek bestäms i viss utsträckning av värdena på β_y och β_z . Ovan utnyttjas resultat från Weils (1979b) mätningar, vilka gjordes under en begränsad tidsperiod. Andra värden har publicerats. Beräkningar har därför också utförts under antagande av att en mindre egenspridning sker och i enlighet med Briggs' (1975) rekommendation, nämligen att $r/z = 0.6$. Motsvarande värde för β_y och β_z , som satts lika, är 0.4.

4.3 Kombination av empiriska och teoretiska metoder

Från ett arbetsmöte arrangerat av The American Meteorological Society (Hanna et. al., 1977) rekommenderas, för spridningsberäkningar från skorstensutsläpp vid konvektiva meteorologiska förhållanden, att teoretiskt bestämda σ_y -värden bör utnyttjas om w_* och h_i är kända. Vi har här valt att beräkna σ_y enligt Weil (1979b, se ekvation (15)). För σ_z rekommenderas värden enligt BNL förutsatt att σ_z är mindre än den effektiva skorstenshöjden. σ_z bör ej heller överskrida $0.8 h_i$.

5. MÄTANLÄGGNINGAR OCH MÄTDATA

De mätdata som vi utnyttjar har sammanställts av Weil (1980). Här följer en kort beskrivning av materialet. SO_2 -halter har mätts runt tre kraftverk i Maryland och tre kraftverk i mellanvästra USA. Halterna som redovisas är de högsta som rapporterats på avstånd relativt nära källorna (inom 3 km) vid konvektiva meteorologiska förhållanden. Det är också där som man kan förvänta sig de högsta markhalterna vid stark konvektion, låg vindhastighet och låg blandningshöjd. Utsläppsdata redovisas i tabell 3. Mätta SO_2 -halter och meteorologiska data redovisas i tabell 4. Dickerson-anläggningen består av tre koleldade 185 MW enheter med två 122 m skorstenar på 60 m avstånd från varandra. Terrängen runt anläggningen är relativt platt. Morgantown-anläggningen ligger också relativt platt och består av två 575 MW enheter med två 213 m skorstenar på 76 m avstånd från varandra. Mätningarna runt Dickerson, Morgantown och Chalk Point gjordes med ett mobilt instrument. Instrumentet kördes tvärs plymens centrumlinje ett flertal gånger, resulterade i 6-10 instantana profiler varje timme. Dessa profiler kombinerades till entimmars medelprofiler.

TERA (1979) genomförde stationära mätningar av timmedelvärdeshalter av SO_2 runt de tre anläggningarna ovan under en två års period. Den enda anläggningen som hade en mätstation inom 3 km var Morgantown. Värdena som redovisas i tabell 3 motsvarar det högsta och näst högsta mätta halten under denna period. Trout (1979) har sammanställt de högsta tre timmars medelvärdeshalterna av SO_2 och de högsta en timmes medelvärdeshalterna från de närmaste mätstationerna runt fyra anläggningar (Muskinham River, John Sevier, Cumberland och Widows Creek), vilka också redovisas i tabellen.

Tabell 3. Utsläppsdata. *Stack Emission Conditions.*

Fall	Anläggning	Datum	Kraft- enhet	h_s (m)	F (m^4/s^3)	Q (kg/s)	Referens
1	Dickerson	2/28/73	1	122	401	0.83	Weil (1977)
			2	122	174	0.36	
2	Dickerson	2/28/73	1	122	398	0.82	Weil (1977)
			2	122	164	0.35	
3	Chalk Point	6/18/74	1	122	412	1.05	Weil (1977)
4	Morgantown	4/23/75	1	213	656	1.95	Weil (1977)
			2	213	656	1.95	
5,6	Morgantown	10/3/78	1	213	700	1.75	TERA (1979)
			2	213	530	1.17	
7-9	Muskingham River	9/5/78	1	252	1 083	5.7	Trout (1979)
			2	252	458	4.5	
10-12	John Sevier	3/25/77	1	107	516	1.92	Trout (1979)
			2	107	516	1.92	
13-15	Cumberland	10/22/77	1	305	2 206	10.5	Trout (1979)

Tabell 4 Meteorologiska data och mätta SO_2 -halter. *Meteorological and concentration measurements.*

Fall	Anläggning	Datum	Tid	z_a (m)	u (m/s)	PG ⁶⁾ Klass	h_i (m)	w_* (m/s)	$\frac{u}{w_*}$	$c_{mätt}$ (ppb(v))	x (m)	Mätmetod
1	Dickerson	2/28/73	1218-1314	NA ¹⁾	1.6 ²⁾	B	1081	1.9	0.8	92	1810	MV ⁴⁾
2	Dickerson	2/28/73	1104-1148	NA	3.2	B	880	1.8	1.8	166	2015	MV
3	Chalk Point	6/18/74	1017-1059	NA	2.8	A	1000	1.9	1.4	114	2802	MV
4	Morgantown	4/23/75	1055-1252	NA	3.7	B	766	1.8	2.1	322	2708	MV
5	Morgantown	10/3/78	1400 ⁵⁾	50	1.0 ³⁾	B	1000	1.7	0.6	310	2720	S ⁴⁾
6	Morgantown	10/3/78	1500	50	1.4	B	1150	1.8	0.8	172	2720	S
7	Muskingham River	9/5/78	1400	26	0.9	B	1050	1.9	0.5	390	1300	S
8	Muskingham River	9/5/78	1500	26	0.4	A	1050	1.8	0.2	530	1300	S
9	Muskingham River	9/5/78	1600	26	0.9	B	1050	1.7	0.5	260	1300	S
10	John Sevier	3/25/77	1500	25	2.2	C	1000	1.7	1.3	560	1600	S
11	John Sevier	3/25/77	1600	25	1.4	B	1000	1.6	0.9	440	1600	S
12	John Sevier	3/25/77	1700	25	1.8	C	1000	1.4	1.3	280	1600	S
13	Cumberland	10/22/77	1500	122	2.3	C	1300	1.7	1.4	270	1800	S
14	Cumberland	10/22/77	1600	122	2.6	C	1300	1.4	1.9	150	1800	S
15	Cumberland	10/22/77	1700	122	1.6	C	1300	0.8	2.0	200	1800	S

Kommentarer: 1. NA = Not applicable.

2. Wind speed measurements for cases 1-4 are average wind speeds over the mixing layer and were obtained from pibals.

3. Wind speed measurements for cases 5-15 are time averages wind speeds measured at height z_a ; averaging time probably varies from 20 min to 1 hr.

4. Concentration measurement method:

MV = concentrations obtained from mobile van; maximum concentration on average crosswind profile.

S = concentrations obtained from stationary monitor; 1 hr averaged concentration.

5. Time given for stationary monitor measurements is hour at end of measurement interval.

6. Pasquill-Gifford stability class.

6. JÄMFÖRELSE AV MODELLRESULTAT MED MÄTDATA

I tabell 5 redovisas resultat av beräkningar med den Gaussiska modellen för olika empiriskt och teoretiskt bestämda värden på spridningsparametrarna. Plymlyft har beräknats enligt avsnitt 2. Vid beräkningarna har vi antagit att plymens centrumlinje sammanfaller med mätpunkten. Antagandet är enligt Weil (1980) giltigt för de mobila mätningarna och troligtvis också giltigt för de stationära mätningarna då de halter som redovisas är de högsta som uppmätts under en lång kontinuerlig period (2 år). Tabellerna visar att bäst resultat erhålls om spridningsparametrar från BNL utnyttjas, ett resultat som är överensstämmande med arbeten av Weil (1977, 1979a,b och 1980). Beräknade halter är i 14 fall av 15 inom en faktor två av mätta halter (se även figur 4). Denna metod ger också den högsta korrelationen mot mätvärdena. Det ser man längst ner i tabell 4 där korrelationskoefficient (R) beräknad ur fall 1-6, 10-15 ges. Fall 7-9 har uteslutits då undre gränsen ($u/w_* \geq 1.2$) för giltigheten av de teoretiska formlerna kraftigt underskrids. I tabellen framgår att BNL ger värdet $R = 0.51$ vilket bara är jämförbart med 0.48 för fallet längst till höger (avsnitt 4.3). För fallet med empiriska spridningsparametrar enligt BNL är emellertid alla 15 värdeparen relevanta. Korrelationskoefficienten för BNL-fallet blir därför $R = 0.66$, vilket är signifikant på 2% nivån dvs det är 2% chans att få $R \geq 0.66$ ur 15 helt okorrelerade värdepar. Vanligen kräver man 1% (ibland 5%) för att signifikans ska anses föreligga.

För spridningsberäkningarna med teoretiskt bestämda spridningsparametrar är överensstämmelsen mellan uppmätta och beräknade halter sämre. Resultat från beräkningar med spridningsparametrar enligt Lamb visar att uppmätta halter underskattas i 8 fall av 12. En mer realistisk beskrivning av spridningen, där hänsyn tas till plymens egenspridning och vertikala meandring, förbättrar inte resultaten på något avgörande sätt. Tabellen visar att beräknade halter med teoretiskt bestämda spridningsparametrar underskattar uppmätta halter då det icke dimensionella avståndet från källan är större än 1.0. Detta tyder på att bättre resultat kan erhållas om direkt hänsyn tas till plymaxelns nedåtgående rörelse, som är känd att inträffa vid konvektion. Tabellen visar också att beräknade halter med teoretiskt bestämda σ_y -värdena, enligt rekommendation av Hanna et al. (1977), ger sämre resultat än beräkningar med spridningsparametrar enligt BNL.

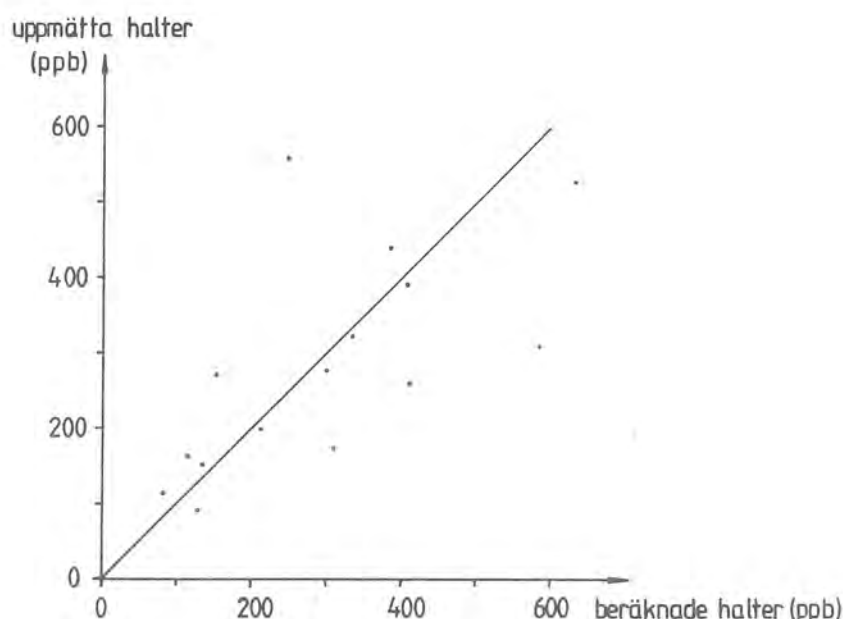
Tabell 5 Resultat av spridningsberäkningarna med den Gaussiska modellen för olika σ_y - och σ_z -värden. Längst ner ges korrelationskoefficienter beräknad ur fall 1,6, 10-15.

Result of Gaussian plume calculations using different dispersion coefficients.

Fall	Anläggning	$x_{\text{mätt}}$	$c_{\text{mätt}}$ (ppb)	BNL		Lamb (1981)		Weil (1979b)		Ekv. 15 och 17		Ekv.15och17 $\beta_y=\beta_z=0.4$		Se av- snitt 4.3		x
				c_{ber} (ppb)	$\frac{c_{\text{ber}}}{c_{\text{mätt}}}$	c_{ber} (ppb)	$\frac{c_{\text{ber}}}{c_{\text{mätt}}}$	c_{ber} (ppb)	$\frac{c_{\text{ber}}}{c_{\text{mätt}}}$	c_{ber} (ppb)	$\frac{c_{\text{ber}}}{c_{\text{mätt}}}$	c_{ber} (ppb)	$\frac{c_{\text{ber}}}{c_{\text{mätt}}}$	c_{ber} (ppb)	$\frac{c_{\text{ber}}}{c_{\text{mätt}}}$	
1	Dickerson	1810	92	128	1.4	81	0.88	64	0.70	71	0.77	76	0.83	78	0.85	2.0
2	Dickerson	2015	166	112	0.67	84	0.51	64	0.39	71	0.43	76	0.46	113	0.68	1.3
3	Chalk Point	2802	114	82	0.72	38	0.33	31	0.27	32	0.28	35	0.31	76	0.67	1.9
4	Morgantown	2708	322	332	1.0	64	0.20	157	0.49	114	0.35	121	0.38	450	1.4	1.7
5	Morgantown	2720	310	587	1.9	127	0.41	145	0.47	121	0.39	124	0.40	334	1.1	4.6
6	Morgantown	2720	172	307	1.8	97	0.56	101	0.59	89	0.52	93	0.54	196	1.1	3.0
7	Muskingham River	1300	390	409	1.0	609	1.56	710	1.8	562	1.4	584	1.5	196	0.49	2.6
8	Muskingham River	1300	530	587	1.1	497	0.88	608	1.1	481	0.91	489	0.92	165	0.31	5.6
9	Muskingham River	1300	260	410	1.6	656	2.52	756	2.9	598	2.3	625	2.4	205	0.79	2.3
10	John Seiver	1600	560	245	0.44	232	0.41	175	0.31	180	0.32	202	0.36	187	0.33	1.2
11	John Seiver	1600	440	385	0.88	281	0.64	232	0.53	238	0.54	257	0.58	247	0.56	1.8
12	John Seiver	1600	280	300	1.1	288	1.0	214	0.76	220	0.79	245	0.88	228	0.81	1.2
13	Cumberland	1800	270	150	0.56	303	1.12	297	1.1	238	0.88	265	0.98	130	0.48	1.0
14	Cumberland	1800	150	133	0.89	365	2.4	311	2.1	249	1.7	291	1.9	136	0.91	0.75
15	Cumberland	1800	200	216	1.1	639	3.2	522	2.6	418	2.1	496	2.5	228	1.1	0.69
R				0.51		0.14		0.14		0.24		0.22		0.48		

Figur 4 Uppmätta och beräknade halter för de 15 fallen i tabell 4. De beräknade halterna avser metoden som ger bäst korrelation nämligen BNL, $R = 0.66$

Measured and predicted concentrations for Gaussian plume calculations using BNL dispersion coefficients, $R = 0.66$



I tabell 6 och figur 5 jämförs de i tabell 5 redovisade uppmätta halterna med resultat från beräkningar med SMHI:s stadsmodell (Bringfelt et. al., 1974) och skorstensmodell (Högström, 1968). Modellerna har under många år utnyttjats vid SMHI. Stadsmodellen blev klar i sin ursprungliga version i början på 1970-talet. Omkring år 1980 förbättrades dess Stockholmsversion och verifierades framgångsrikt mot mätvärden för SO_2 (Bringfelt m fl, 1980). Tabellen visar att stadsmodellen ger betydligt lägre halter än de uppmätta. Orsaken till detta är främst att stadsmodellen inte har någon riktig klass för konvektiva meteorologiska förhållanden då modellen är avsedd för vinterhalvåret. Ser man på figur 5, som gäller fall 1, finner man dock att stadsmodellens beräknade maximala haltnivå stämmer bra med den uppmätta halten men inträffar ca 3 km därifrån. Samma förhållanden gäller även flera andra fall. Den andra modellen, skorstensmodellen, togs i bruk i början av 1960-talet och är avsedd för enstaka (i vissa fall upp till ca 10) skorstenar. Modellen ger för höga halter och maximala halter för nära källan. En bidragande orsak till detta är att de plymlyft som utnyttjats vid beräkningarna är lägre än de sannolikaste. Plymlyft har beräknats genom antagande av 25% risknivå, vilket varit vanligt vid SMHI:s skorstensutredningar. Antagandet innebär att sannolikheten är 75% att det verkliga plymlyftet är högre än det beräknade. Jämförelsen ovan illustrerar vad vi visste förut (och skälet till detta arbete) nämligen att SMHI:s i bruk varande spridningsmodell inte är tillfyllest för spridningsberäkningar från utsläpp från höga skorstenar vid konvektiva meteorologiska förhållanden.

Tabell 6. Jämförelse mellan uppmätta och beräknade markhalter av SO_2 med SMHIs stads- och skorstensmodell.

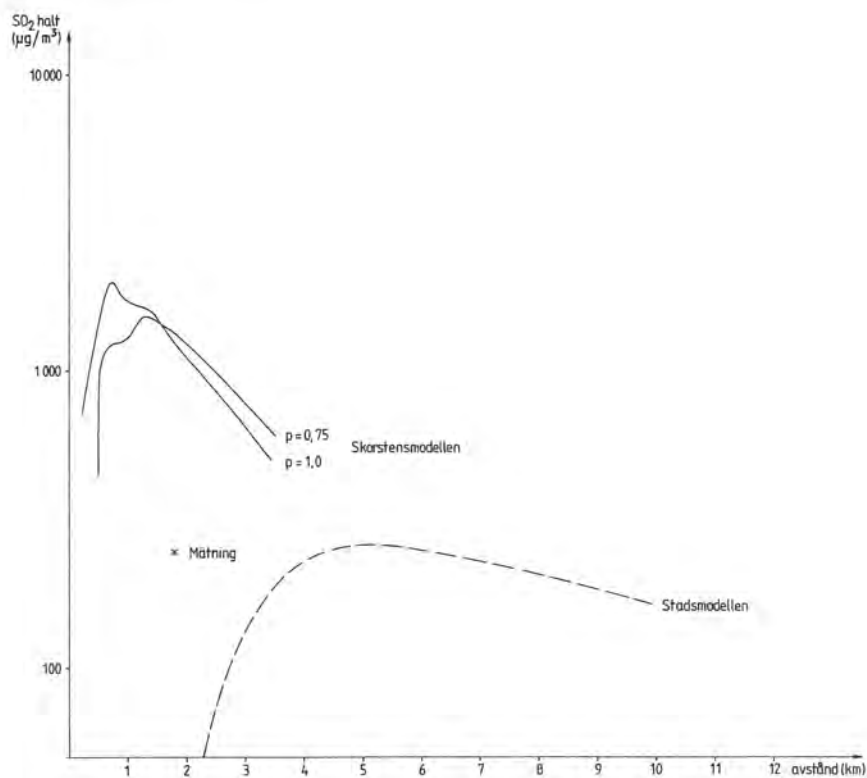
Comparison between measured and predicted ground level SO_2 concentrations using dispersion models used at SMHI.

Fall	$x_{\text{mätt}}$	Stadsmodellen				Skorstensmodellen			
		$c_{\text{mätt}}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	c_{ber} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\frac{c_{\text{ber}}}{c_{\text{mätt}}}$	$\frac{c_{\text{ber}}}{c_{\text{mätt}}}$	c_{ber} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\frac{c_{\text{ber}}}{c_{\text{mätt}}}$	c_{ber} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\frac{c_{\text{ber}}}{c_{\text{mätt}}}$
1	1810	242	10	0.04	1247	5.2	1370	5.7	
2	2015	437	275	0.63	823	1.9	960	2.2	
3	2802	300	250	0.83	480	1.6	590	2.0	
4	2708	847	190	0.22	1425	1.7	1631	1.9	
5	2720	816	50	0.06	1929	2.4	2030	2.5	
6	2720	453	10	0.02	1677	3.7	1887	4.2	
7	1300	1026	0	0.0	4032	3.9	1539	1.5	
8	1300	1395	0	0.0	47	0.03	2	0.0	
9	1300	684	0	0.0	4032	3.9	1539	1.5	
10	1600	1474	76	0.05	3900	2.6	4200	2.8	
11	1600	1158	0	0.0	4305	3.7	4171	3.6	
12	1600	737	12	0.02	4099	5.6	4246	5.8	
13	1800	711	0	0.0	4358	6.1	3402	4.8	
14	1800	395	0	0.0	4175	10.6	3326	8.4	
15	1800	526	0	0.0	4494	8.5	3077	5.8	

1) p anger en parameter i skorstensmodellen som ingår för beräkning av σ_z
 p=1.0 för månaderna maj-aug
 p=0.75 för månaderna april och sept

Figur 5. Jämförelse mellan uppmätt halt (fall 1, tabell 4) och beräknade halter med SMHIs stads- och skorstensmodell.

Comparison between measured (case 1) and predicted ground level SO_2 concentrations.



7. SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER

Målsättningen för detta arbete har varit att formulera en bra men enkel modell för luftföroreningsspridning från skorstenar vid konvektiva meteorologiska förhållanden. Olika modeller diskuteras i rapporten. Den som väljs är den Gaussiska modellen med plymlyftsformler enligt Weil (1980). Ett huvudproblem vid spridningsberäkningar är att välja spridningsparametrar. Det finns ett flertal olika empiriska och teoretiska metoder, som ger betydande skillnader som resultat. En praktisk infallsvinkel har här valts: Om en Gaussisk spridningsmodell utnyttjas, vilka värden på spridningsparametrarna skall då väljas? Olika formuleringar har testats mot mätdata från några olika anläggningar i USA. Resultaten från beräkningarna visar att bäst överensstämmelse mellan beräknade och uppmätta markhalter av SO_2 erhålles med empiriska spridningsparametrar från Brookhaven National Laboratory, ett resultat som är i överensstämmelse med arbeten av Weil (1977, 1979a,b och 1980). Beräknade halter är i 14 fall av 15 inom en faktor två av uppmätta halter. Beräkningar med teoretiskt bestämda spridningsparametrar för värmepassiva partiklar (Lamb, 1981) ger i 8 fall av 12 för låga halter. En mer realistisk formulering, där beskrivning av plymens egenspridning ingår, förbättrar inte resultaten på något avgörande sätt. Detta tyder på att direkt hänsyn måste tas till plymaxelns nedåtgående rörelse, som är känd att inträffa vid konvektiva förhållanden, vid utnyttjande av teoretiskt bestämda spridningsparametrar. Beräkningar har också utförts med SMHIs nuvarande spridningsmodeller. SMHIs s k stadsmodell (Bringfelt et. al., 1974) ger i samtliga fall för låga halter. Beräknade halter är i endast 2 fall av 15 inom en faktor två av uppmätta halter. Orsaken till detta är främst att stadsmodellen inte har någon riktig konvektiv meteorologisk klass, då modellen framför allt är avsedd för vinterhalvåret. Skillnaden mellan uppmätt och beräknad halt är dock inte så stor om hänsyn tas till att stadsmodellen ger haltmaximum på större avstånd än där man mätt. SMHIs s k skorstensmodell (Högström, 1968) ger i 14 fall av 15 för höga halter. Beräknade halter är endast i 3 fall av 15 inom en faktor två av uppmätta halter. Denna tendens, som också beror på de relativt låga plymlyft som utnyttjats vid beräkningarna, har varit känd sedan tidigare som en brist i modellen och har utgjort ett skäl för detta arbete. SMHIs nuvarande spridningsmodeller är inte heller avsedda att utnyttjas vid beräkningar vid så höga skorstenar som här studerats.

8. REFERENSER

Briggs, G.A., 1975: Plume rise predictions. Environmental Research Laboratories, Oak Ridge, Tennessee.

Briggs, G.A., 1980, se Turner 1980.

Bringfelt B., Hjort T., Ring S., 1974: A numerical air pollution dispersion model for central Stockholm, Atmospheric Environment Vol. 8, No 2 pp. 131-148.

Bringfelt B., Orrskog G., Hjort T., 1981: Förbättring av matematisk spridningsmodell utvecklad för Stor-Stockholm avseende SO₂. SMHI.

Deardorff, J.W. and Willis G.E., 1975: A parameterization of diffusion into the mixed layer. J Appl. Meteor., 14, 1451-1458.

Hanna, S.R., Briggs, G.A., Deardorff J., Egon, B.A., Gifford, F.A. and Pasquill, F., 1977: A M S workshop on stability classification schemes and sigma curves - summary and recommendations. Bull. Am. Meteorol. Soc. 58:1305-1309.

Heidorn, K.C., 1981: A note on plume geometry from a tall stack. Boundary-Layer Meteorology 20, 027-034.

Högström U., 1968: A statistical approach to the air pollution problem of chimney emission. Atmospheric Environment 2, 251-271.

Lamb, R.G., 1979: The effects of release height on material dispersion in the convective planetary boundary layer. Preprint Volume, Fourth Symp. on Turbulence Diffusion and Air Pollution. Reno, Nevada, 15-18 Jan 1979, pp 27-33.

Lamb, R.G., 1981: Diffusion in the convective boundary layer. A short course on atmospheric turbulence and air pollution modelling. 21-25 September 1981. The Hague, The Netherlands.

Singer, I.A. and Smith, M.E., 1966: Atmospheric Dispersion at Brookhaven National Laboratory. Int. J of Air and Water Pollution, 10:125-135.

TERA. 1979: Morgantown area atmospheric survey October through December, 1978 and annual summary. Report prepared by Teknekron Energy Resource Analysts, Bethesda, Md., for Potomac Electric Power Company, Washington, D.C. Report No. 5658-78-Q4-M.

Trout, D.A., 1979: A review of horizontal and vertical dispersion coefficients applied in the calculation of ground-level pollutant concentrations resulting from emission from tall stacks and very unstable atmospheric conditions. Paper presented at 10th International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application, Rome, Italy, October 23-26, 1979.

Turner B., 1980: Föreläsningssanteckningar från "Problems connected with the evaluation of dispersion of air pollutants from major sources". Korpilampi, FMI.

Venkatram, A., 1980: Dispersion from an elevated source in a convective boundary layer. *Atm. Environ.* 14:1-10.

Venkatram, A. and Vet, R., 1981: Modeling of dispersion from tall stacks. *Atm. Environ.* 15, 1531-1538.

Weil, J. C, and Jepsen, A. F., 1977: Evaluation of the Gaussian plume model at the Dickerson powerplant. *Atm. Environ.* 11, 901-910.

Weil, J.C., 1979: Applicability of stability classification schemes and associated parameters to dispersion of tall stack plumes in Maryland. *Atm. Environ.* 13, 819-831.

Weil, J.C., 1979b: Assessment of plume rise and dispersion models using lidar data. Maryland Power Plant Siting Program. Report PPSP-MP-24. Martin Marietta Environmental Center, Baltimore, MD.

Weil, J.C., 1980: Performance of simple models for stack plume dispersion during convective conditions. Maryland Power Plant Siting Program. Report PPSP-MP-30. Martin Marietta Environmental Center, Baltimore, MD.

SMHI Rapporter, METEOROLOGI OCH KLIMATOLOGI (RMK)

- Nr 1 Thompson, T, Udin, I and Omstedt, A
Sea surface temperatures in waters surrounding Sweden. (1974)
- Nr 2 Bodin, S
Development on an unsteady atmospheric boundary layer model. (1974)
- Nr 3 Moen, L
A multi-level quasi-geostrophic model for short range weather predictions. (1975)
- Nr 4 Holmström, I
Optimization of atmospheric models. (1976)
- Nr 5 Collins, W G,
A parameterization model for calculation of vertical fluxes of momentum due to terrain induced gravity waves. (1976)
- Nr 6 Nyberg, A
On transport of sulphur over the North Atlantic. (1976)
- Nr 7 Lundqvist, J-E and Udin, I
Ice accretion on ships with special emphasis on Baltic conditions. (1977)
- Nr 8 Eriksson, B
Den dagliga och årliga variationen av temperatur, fuktighet och vindhastighet vid några orter i Sverige. (1977)
- Nr 9 Holmström, I and Stokes, J
Statistical forecasting of sea level changes in the Baltic. (1978)
- Nr 10 Omstedt, A and Sahlberg, J
Some results from a joint Swedish-Finnish Sea Ice Experiment, March, 1977. (1978)
- Nr 11 Haag, T
Byggnadsindustrins väderberoende, seminarieuppsats i företagsekonomi, B-nivå. (1978)
- Nr 12 Eriksson, B
Vegetationsperioden i Sverige beräknad från temperaturobservationer. (1978)
- Nr 13 Bodin, S
En numerisk prognosmodell för det atmosfäriska gränsskiktet grundad på den turbulenta energiekvationen.
- Nr 14 Eriksson, B
Temperaturfluktuationer under senaste 100 åren. (1979)
- Nr 15 Udin, I och Mattisson, I
Havsis- och snöinformation ur datorbearbetade satellitdata - en modellstudie. (1979)
- Nr 16 Eriksson, B
Statistisk analys av nederbördsdata. Del I. Arealnederbörd(1979)
- Nr 17 Eriksson, B
Statistisk analys av nederbördsdata. Del II. Frekvensanalys av månadsnederbörd. (1980)
- Nr 18 Eriksson, B
Årsmedelvärden (1931-60) av nederbörd, avdunstning och avrinning. (1980)
- Nr 19 Omstedt, A
A sensitivity analysis of steady, free floating ice. (1980)

- Nr 20 Persson, C och Omstedt, G
En modell för beräkning av luftföroreningars spridning och deposition på mesoskala (1980)
- Nr 21 Jansson, D
Studier av temperaturinversioner och vertikal vindskjuvning vid Sundsvall-Härnösands flygplats (1980)
- Nr 22 Sahlberg, J and Törnevik, H
A study of large scale cooling in the Bay of Bothnia (1980)
- Nr 23 Ericson, K and Hårsmar, P-O
Boundary layer measurements at Klockrike. Oct 1977 (1980)
- Nr 24 Bringfelt, B
A comparison of forest evapotranspiration determined by some independent methods (1980)
- Nr 25 Bodin, S and Fredriksson, U
Uncertainty in wind forecasting for wind power networks (1980)
- Nr 26 Eriksson, B
Graddagsstatistik för Sverige (1980)
- Nr 27 Eriksson, B
Statistisk analys av nederbördsdata. Del III 200-åriga nederbördsserier. (1981)
- Nr 28 Eriksson, B
Den "potentiella" evapotranspirationen i Sverige (1981)
- Nr 29 Pershagen, H
Maximisnödjun i Sverige (perioden 1905-70) (1981)
- Nr 30 Lönnqvist, O
Nederbördsstatistik med praktiska tillämpningar (Precipitation statistics with practical applications) (1981)
- Nr 31 Melgarejo, J W
Similarity theory and resistance laws for the atmospheric boundary layer (1981)
- Nr 32 Liljas, E
Analys av moln och nederbörd genom automatisk klassning av AVHRR data (1981)
- Nr 33 Ericson, K
Atmospheric Boundary Layer Field Experiment in Sweden 1980, GOTEX II, part I (1982)
- Nr 34 Schoeffler, P
Dissipation, dispersion and stability of numerical schemes for advection and diffusion (1982)
- Nr 35 Undén, P
The Swedish Limited Area Model (LAM). Part A. Formulation (1982)
- Nr 36 Bringfelt, B
A forest evapotranspiration model using synoptic data (1982)
- Nr 37 Omstedt, G
Spridning av luftföroreningar från skorstenar i konvektiva gränsskikt (1982)



SWEDISH METEOROLOGICAL AND HYDROLOGICAL INSTITUTE
Box 923, S-601 19 Norrköping, Sweden. Phone+46 11 10 80 00. Telex 644 00 smhi s

ISSN 0347-2116