

NILU
OPPDRAKSRAFFORT NR 27/76
REFERANSE: 23875
DATO: DESEMBER 1976

SKORSTEINSHØYDER OG RØYKGASSTEMPERATUR
ETTER RENSING AV AVGASSENE
FRA ET VARMEKRAFTVERK

AV

BJARNE SIVERTSEN OG YNGVAR GOTAAS

NORSK INSTITUTT FOR LUFTFORSKNING
POSTBOKS 130, 2001 LILLESTRØM
NORGE

SUMMARY

Stack heights and effluent gas temperature requirements have been calculated after sea water scrubbing for removal of SO₂ from a 2x600 MWe oil fired power plant. The calculations have been based upon the following requirements of maximum ground level concentrations: 360 µg SO₂/m³ and 320 µg NO₂/m³, both measured as one hour average. These criteria should also be met using oil with 1% sulfur and no sea water scrubbing.

The following conclusions have been drawn:

- using oil with 1% sulfur and no scrubbing will require a stack height of not less than 150 m.
- 90% or 95% scrubbing efficiency for SO₂ removal will result in maximum ground level concentrations below 360 µg SO₂/m³ if only the effluent gas temperature is more than 15 degrees higher than the surrounding air temperature, using a 150 m high stack.
- nitrogenoxide-emissions equivalent to earlier specifications (3300 kg NO_x/h (as NO₂)) might require stack gas reheating till as much as about 100 degree above the air temperature, for a 150 m high stack.
- if the nitrogenoxide emissions can be reduced to 1400 kg/h (as NO₂), the maximum ground level concentration of 320 µg NO₂/m³ will not be exceeded, for emissions from a 150 m high stack.

INNHOLDSFORTEGNELSE

	Side
1 <u>INNLEDNING</u>	4
2 <u>UTSLIPPSFORHOLD</u>	5
3 <u>LUFTKVALITET</u>	6
3.1 <u>Svoveldioksyd SO₂</u>	6
3.2 <u>Nitrogenoksyder</u>	6
3.3 <u>Vanadium</u>	7
4 <u>METEOROLOGI OG SPREDNINGSFORHOLD</u>	7
5 <u>BEREGNINGSGRUNNLAG</u>	8
6 <u>RESULTATER</u>	8
6.1 <u>Ingen gassrensing, 1% svovel i oljen</u>	8
6.2 <u>Svoveldioksydkonsentrasjoner</u>	8
6.2.1 <u>90% reduksjon av svoveldioksydutslippet</u> ...	8
6.2.2 <u>95% reduksjon av svoveldioksydutslippet</u> ...	9
6.3 <u>Nitrogenoksydkonsentrasjoner</u>	9
6.3.1 <u>Alternativ 4, 3300 kg NO_x/h</u>	9
6.3.2 <u>Alternativ 5, 1400 kg NO_x/h</u>	10
7 <u>DISKUSJON OG KONKLUSJON</u>	10
8 <u>REFERANSER</u>	12

BILAG 1.

BILAG 2.

1 INNLEDNING

Etter oppdrag fra NVE Statskraftverkene utreder A/S Norsk Viftefabrikk (NV) muligheten for renseanlegg ved et oljefyrt varmekraftverk. I den anledning er Norsk Institutt for Luftforskning (NILU) blitt anmodet om å gjennomføre beregninger for å estimere nødvendige skorsteinshøyder og luftkvalitet for alternative utslippsbetingelser.

NILUs oppgave ble nærmere spesifisert i møte mellom A/S Norsk Viftefabrikk, NVE Statskraftverkene og NILU 31.8.76. Et foreløpig notat med resultater ble sendt A/S Norsk Viftefabrikk i brev av 6.10.76, med kopi til NVE.

2 UTSLIPPSFORHOLD

Beregningene er utført for et kraftverk med 2 aggregater, hvert på 600 MWe og med én skorstein på hvert aggregat. Skorsteinene er antatt å stå så nær hverandre at en i beregningene av bakkekonsentrasjonen kan anta et samlet utslipp fra tilnærmet samme punkt. En har dessuten regnet med følgende faste utslippsparametre:

Røykgassmengde pr skorstein:	1.600.000 Nm ³ /h
Skorsteinsdiameter:	6 m
Utslippshastighet ved rensing og ettervarming:	19 m/s
Utslippshastighet ved omløp (uten rensing):	22 m/s
Oljeforbruk pr aggregat:	130 000 kg/h
Svovelinnhold i oljen ved avgassrensing:	2,5% S
Svovelinnhold i oljen til etteroppvarming:	1,0% S
Svovelinnhold i oljen uten bruk av renseanlegg:	1,0% S

Følgende alternative utslippsforhold er vurdert:

1. Skorsteinshøyde uten avgassrensing og fyring med tungolje med 1% svovel.
2. Ettervarming ved 90% reduksjon av svovelutslippet og skorsteinshøyde ifølge pkt. 1.
3. Ettervarming ved 95% reduksjon av svovelutslippet, skorsteinshøyde ifølge pkt. 1.
4. Etteroppvarming og eventuell skorsteinshøyde for rensing av svovelutslippet (90% og 95%) og et nitrogenoksydutslipp ifølge tidligere antatte utslippsfaktorer (2)(3).
5. Røykgasstemperatur (evt. skorsteinshøyde) ved rensing av svovelutslippet, og et nitrogenoksydutslipp som angitt av US Environmental Protection Agency (4).

Ut fra forannevnte utslippsbetingelser har en brukt utslippsmengder for 2 aggregater som angitt i tabell 1.

Tabell 1: Utslippsmengder for oljefyrt varmekraftverk med 2 aggregater, hvert på 600 MWe, og for alternative utslippsbetingelser gitt i teksten.

Alternativ	SO ₂ (kg SO ₂ /h)	NO _x (kg NO ₂ ^x /h)	Vanadium (kg V/h)
1	5200	3300	<15
2 og 4	1440	3300	-
2 og 5	1440	1400	-
3 og 4	720	3300	-
3 og 5	720	1400	-

Tallene er rundet av oppover (ca 10% tillegg) for å ta hensyn til utslippet fra eventuell ettervarming av avgassene.

3 LUFTKVALITET

Som grunnlag for vurdering av de beregnede bakkekonsentrasjonene ved forskjellige utslippsforhold vises det til oversikt over normer gitt i tidligere rapport (1).

3.1 Svoveldioksyd (SO₂)

Det er tatt hensyn til mulige utslipp fra andre kilder i området ved å anta at varmekraftverket ikke får bidra med mer enn 360 µg SO₂/m³ som bakkekonsentrasjon midlet over en time.

3.2 Nitrogenoksyder

I tillegg til tidligere refererte normer (1), har det kanadiske miljøverndepartementet presentert et forslag om at nitrogen-dioksyd ikke får overskride 400 µg NO₂/m³ som timesmiddel (6).

Dessuten er det i en uoffisiell rapport fra verdens helseorganisasjons møte i Tokyo 23.8 - 4.9.76 sagt at "the WHO task force on NO₂ health criteria reached a consensus on an hourly value of 0.1 to 0.17 ppm (equivalent to 190 to 320 µg/m³).

Mesteparten av nitrogenoksydene slipper ut fra skorsteinene som nitrogenmonoksyd (NO), men vil i atmosfæren oksyderes til nitrogendioksyd (NO₂). Oksydasjonen skjer raskest ved solskinn og høye lufttemperaturer. Dette er ofte de samme meteorologiske forhold som gir maksimal bakkekonsentrasjon. For å være på den sikre siden har en derfor antatt at alle nitrogenoksydene i maksimalsonen foreligger som NO₂, og at bakkekonsentrasjonen ikke skal overskride 320 µg NO₂/m³.

3.3 Vanadium

Vanadium antas å slippe ut fra varmekraftverket som vanadiumpentoksyd (V₂O₅) som er lett løselig i vann. Sjøvannrensing vil derfor trolig fjerne en betydelig del.

4 METEOROLOGI OG SPREDNINGSFORHOLD

Beregningene er utført for realistiske meteorologiske forhold. De tilfellene som resulterer i maksimale bakkekonsentrasjoner er sammenlignet med meteorologiske observasjoner fra Oslofjordområdet.

Det er ikke tatt hensyn til topografiske effekter, da slike effekter er vanskelig å vurdere før byggestedet er valgt.

Betydningen av stagnasjonsforhold, med liten vind og stabil luft (inversjonssituasjoner) er heller ikke vurdert. En må imidlertid anta at en reduksjon av røykskyens totalhøyde over bakken, vil øke sannsynligheten for at en under inversjonsforhold og i stagnasjonsperioder i topografisk ulendt terreng kan få uheldige høye konsentrasjoner i bakkenivå.

Sjøvannrensing vil redusere røykskyens oppdrift etter utslippet fra skorsteinen, og således minske røykskyens totalhøyde over bakken. På den andre siden vil utslippet av forurensende stoffer være mindre, slik at den integrerte virkning over lang tid og på store avstander vil være redusert i forhold til tilfellet med ikke-renset gass.

5 BEREGNINGSGRUNNLAG

De matematiske formuleringene som er anvendt i spredningsberegningene er nærmere presentert i bilag 2. Modellene er basert på at konsentrasjonsfordelingen i røykskyen er gaussisk (normalfordelt) horisontalt og vertikalt vinkelrett på vindretningen. Beregningene gjelder gassformige, kontinuerlige utslipp over flatt, homogent terreng.

Vesentlig i disse beregningene er bestemmelsen av røykskyens overhøyde på grunn av varmeoverskudd i forhold til omgivelsene. Her har en anvendt to typer empiriske (eller halvempiriske) modeller; Stümkes formler for utslipp der temperaturen i avgassen ikke er vesentlig høyere enn i den omgivende luft og Briggs' formler når varmeoverskuddet i røyken er betydelig (7)(8).

6 RESULTATER

6.1 Ingen gassrensing, 1% svovel i oljen

Som i tidligere beregninger (1) er en kommet til at ved et kraftverk fyrt med olje med 1% svovel og uten gassrensing, bør skorsteinene ikke være lavere enn 150 m. (SO₂ er i dette tilfellet det dimensjonerende utslippet.)

6.2 Svoveldioksydkonsentrasjoner

6.2.1 90% reduksjon av svovelutslippet

Dersom en fortsatt krever en skorsteinshøyde på 150 m vil kravet til ettervarming av avgassene i første rekke være bestemt av at temperaturen i utslippet bringes godt over lufttemperaturen,

for å hindre nedsynkning av røykfanen. Temperaturen må bringes opp slik at tettheten av avgassene blir mindre enn den omgivende luftets tetthet. Dette krever en oppvarming til minst 12-15 grader over lufttemperaturen. Under disse forutsetninger vil svovelutslippet i følge beregninger, resultere i maksimale bakkekonsentrasjoner godt under det kravet vi har satt på $360 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

6.2.2 95% reduksjon av svovelutslippet

Det samme kravet til oppvarming av avgassene gjelder for 95% rensing som for 90% rensing. Hvis avgasstemperaturen er minst 20 grader høyere enn lufttemperaturen, viser beregningene for en 150 m høy skorstein at den maksimale bakkekonsentrasjonen (over flatt land) vil ligge rundt $100 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$.

6.3 Nitrogenoksydkonsentrasjoner

6.3.1 Alternativ 4, 3300 kg NO_x/h

Hvis en antar et utslipp av nitrogenoksyder på størrelse med tidligere angitte verdier (1) eller med oppgaver gitt i bilag 1, vil kravene til maksimal NO_x-konsentrasjon i bakkenivå fordre større etteroppvarming enn angitt for svoveldioksydutslippet i kap. 6.2.1.

For en skorsteinshøyde på 150 m må avgassene ifølge beregningene være minst 100 grader varmere enn lufta. Dette er imidlertid kritisk avhengig av den modell for røykhevning som velges.

Det er ikke tatt hensyn til endring i avgassenes egenvekt som følge av endring i røykens vanninnhold etter rensingen, eller til eventuell frigjørelse av kondensasjonsvarme, da disse problemene ikke er tilstrekkelig godt utredet. En har derfor valgt å basere vurderingene på Stümkes formel for røykhevning i de tilfellene en rensar avgassene, og avgasstemperaturen ikke er mye høyere enn lufttemperaturen. Dette resulterer sannsynligvis i et underestimat av overhøyden, og således et overestimat av bakkekonsentrasjonene.

Hvis skorsteinene er høyere enn 150 m, vil kravet til ettervarming være mindre. Sammenhengen mellom skorsteinshøyde og nødvendig etteroppvarming kan beregnes, men er igjen sterkt avhengig av hvilken modell for overhøyde som velges for de forskjellige tilfellene (se bilag 2). Beregninger viser at for en skorstein på 180 m må avgassene være ca 40 grader varmere enn lufta for at bakkekonsentrasjonen ikke skal overskride $320 \mu\text{g NO}_x/\text{m}^3$ regnet som NO_2 .

6.3.2 Alternativ 5, 1400 kg NO_x/h

Hvis en antar at nitrogenoksydutslippet kan reduseres til 0.54 g pr million cal. varme fra oljebrenningen, som spesifisert i "U.S. federal standard of performance for new stationary sources" (4)(5), vil dette svare til et utslipp på $1400 \text{ kg NO}_x/\text{h}$. (som NO_2). Antar en at dette utslippet foreligger som NO_2 i bakkenivå, og videre at bakkekonsentrasjonen ikke skal overskride $320 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$, må en, som for det tilsvarende svoveldioksydutslippet (kap. 6.2.1), forlange at avgass-temperaturen minst må være 12-15 grader høyere enn luft-temperaturen. Hvis avgassene eksempelvis er 40 grader varmere enn omgivende luft, vil maksimal bakkekonsentrasjon være mindre enn $200 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$ midlet over en time.

7 DISKUSJON OG KONKLUSJON

Resultatene av den type beregninger som er foretatt i denne rapporten er i stor grad avhengig av valg av spredningsparametre og modeller for beregning av røykhevning.

For varme utslipp (fra konvensjonelle varmekraftverk) finnes det en rekke teoretisk baserte og halvempiriske formler. Kalde utslipp derimot er langt mindre undersøkt såvel teoretisk som empirisk.

En har i dette arbeidet i størst mulig utstrekning forsøkt å vurdere meteorologi, parametervalg og overhøydeberegning i hvert enkelt tilfelle ut fra anvendelsesområdet for modellene, og på denne måten forsøkt å være på den sikre siden. Usikkerheten i beregningene er vanskelig å angi.

Reduksjon av svovelutslippet med 90 eller 95% ved hjelp av sjøvannsvasking, vil gi tilfredsstillende lave bakkekonsentrasjoner av SO_2 , bare avgasstemperaturen er mer enn ca 15 grader over lufttemperaturen og skorsteinshøyden ikke er lavere enn 150 m.

Med tidligere oppgitte nitrogenoksydutslipp må avgasstemperaturen fra en 150 m høy skorstein være ca 100 grader høyere enn lufttemperaturen. Hvis nitrogenoksydutslippet kan reduseres til det som er spesifisert i "U.S. federal standard of performance for new stationary sources" (5), gjelder det samme krav til avgasstemperaturen som for SO_2 -rensing.

Den samme "U.S. federal standard of performance for new stationary sources" spesifiserer også et maksimalt SO_2 -utslipp. For fyring uten avgassrensing svarer dette til olje med et svovelinnhold på mindre enn 0.72%. For 90% rensing vil også dette kravet være tilfredsstillt om en anvender olje med 2.5% svovel.

8 REFERANSER

- (1) Sivertsen, B. Virkninger av luftforurensninger fra et oljefyrt varmekraftverk (Østlandet-Rogaland-Sørlandet) NILU Oppdragsrapport nr 1/76, nov. 1975.
- (2) Compilation of Air Pollutant Emission factors. U.S. Environmental Protection Agency Publications AP-42 Feb. 1972.
- (3) Laxton, J.W. Brev til NILU, om NO_x-utslipp fra varmekraftverk fra Central Electricity Generating Board, England, datert Leatherhead 2.9.1976 (se forøvrig bilag 1).
- (4) Chaput, L.S. Federal Standards of Performance for new Stationary Sources of Air Pollution, A Summary of Regulations. Journ. of Air Pollution Control Ass. 26, 55-60 (1976).
- (5) Environmental Protection Agency Standards of Performance for New Stationary Sources. Federal Register Vol. 36 No 24 Washington D.C. Dec. 23, 1971.
- (6) Maximum Tolerable Levels Announced for the 5 Major Air Contaminants News Release, Environment Canada 9.8.1974.
- (7) Sivertsen, B. Plume Rise Calculations. NILU Teknisk notat nr 80/74, (Juli 1974).
- (8) Briggs, G.A. Chimney Plumes in Neutral and Stable Surroundings. Atm. Env. 6, 507-510 (1972).
- (9) Smith, M. Recommended Guide for the Prediction of the Dispersion of Airborne Effluents ASME, New York 1968.
- (10) Gotaas, Y. Regler og retningslinjer for fastsettelse av skorsteinshøyder. NILU Oppdragsrapport nr 85/74 (1974).
- (11) Bringfelt, B. Plume Rise Measurements at Industrial Chimneys. Atm. Env. 2, 575-598 (1968).

BILAG 1

Utslippsoppgaver mottatt fra Central Electricity Generating Board, Leatherhead, England, i brev til NILU datert 2.9.1976.

NO_x EMISSIONS FROM MAJOR CEGB
FOSSIL FUEL FIRED GENERATING BOARD (1975/76)

	Consumption 10 ⁶ /year	Emission factors kg/t fuel	Est.emission 10 ⁶ t,
coal	67	7 - 9	0.59
oil	9.6	12 - 14.5	0.14
	1.8	5	<u>0.03</u>
		Total	<u>0.76</u>

Distillate fuel-oil burned during the period was insignificant due to the low load factor on plant burning such expensive fuel (e.g. gas turbines and diesel units).

-14-

Blank

BILAG 2

BEREGNINGSGRUNNLAG

Spredningsformlene som er anvendt i disse beregningene gjelder for gassformige, kontinuerlige utslipp, og tar ikke hensyn til endringer av røykgassenes sammensetning under spredningen.

1 Spredningsformler

Hvis en benytter et rettvinklet koordinatsystem med origo i skorsteinsbasis, x-aksen horisontalt i middelvindens retning, y-aksen normalt på denne i horisontalplanet og z-aksen vertikalt, er konsentrasjonen χ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) i punktet (x, y, z) gitt ved:

$$\chi(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi \sigma_y \sigma_z u_s} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot \left\{ e^{-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(H+z)^2}{2\sigma_z^2}} \right\} [1]$$

Her er Q utslippsmengden ($\mu\text{g}/\text{s}$), u_s er middelvindhastigheten mellom bakken og røykskyen (m/s) og H er effektiv skorsteinshøyde (m). Konsentrasjonsfordelingen normalt på x-aksen er beskrevet ved normalfordelinger både horisontalt og vertikalt. Spredningsparametrene σ_y og σ_z er standardavvikene (m) i disse fordelingene og er funksjonen av avstanden fra kilden og av turbulensintensiteten. Beregningene forenkles vanligvis ved at en bare beregner de maksimale konsentrasjonene på bakken, dvs. langs røykfanens akse ($y = z = 0$). Spredningsformelen reduseres da til:

$$\chi(x, 0, 0, H) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} e^{-\left(\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right)} [2]$$

2 Spredningsparametre

Standardavviket i den horisontale og vertikale konsentrasjonsfordelingen, er gitt som funksjon av avstanden fra utslippet:

$$\begin{aligned}\sigma_y &= a \cdot x^p \\ \sigma_z &= b \cdot x^q\end{aligned}\quad [3]$$

Det foreligger i litteraturen forskjellige verdier for konstantene a , b , p og q . For vurdering av utslipp fra høye skorsteiner, har en valgt å ta utgangspunkt i data fra et 100 m høyt utslipp ved Brookhaven National Laboratory i USA (9). Spredningsklassene er modifisert noe for tilpassing til norske forhold, idet den mest ustabile klassen er sløyfet og en lett stabil klasse innført. Følgende konstanter inngår i de 4 stabilitetsklassene som er anvendt:

	a	b	p	q
Instabil temperatursjiktning	0.36	0.33	0.86	0.86
Nøytral "	0.32	0.22	0.78	0.78
Lett stabil "	0.31	0.16	0.74	0.74
Stabil "	0.31	0.06	0.71	0.71

Usikkerheten i spredningsparametrene øker med avstanden fra kilden, og de bør ikke anvendes for avstander mer enn 10 km fra utslippet. De anvendte spredningsparametrene gir gasskonsentrasjoner i røykskyen midlet over 1 time.

3 Effektiv skorsteinshøyde (H)

Bakkekonsentrasjonen er avhengig av høyden på røykskyens akse over bakken (H). Denne høyden er definert ved uttrykket:

$$H = h_s + \Delta h - k \cdot h_t \quad [4]$$

hvor h_s er den fysiske skorsteinshøyden og Δh er overhøyden som resultat av røykens utslippshastighet og varmeoverskudd i forhold til omgivelsene. h_t er høyden av de topografiske ujevnhetene over det nivå der skorsteinen er plassert, og k er en faktor mellom 0 og 1, avhengig av terrengets beskaffenhet og bratthet, atmosfærisk stabilitet og røykskyens høyde i forhold til terrenget.

For beregning av overhøyden er det utviklet en rekke formler. De fleste er empiriske formler som bygger på observasjoner av røykfaner under forskjellige meteorologiske forhold. Riktig valg av overhøydeformel er av stor betydning for en riktig vurdering av luftkvalitet og skorsteinshøyde ved et nytt anlegg. Det er vanligvis stor spredning i resultatene fra de forskjellige formlene. Hvis overhøyden overestimeres vil bakkekonsentrasjonene bli for lave, og den fysiske skorsteinshøyden blir anslått for lav.

For store varmekraftverk med høye piper og stort varmeoverskudd anbefales Briggs' formel for overhøydeberegning (7,8).

$$\left. \begin{aligned} \Delta h &= 1.6 \cdot F^{1/3} u^{-1} \cdot x^{2/3} && (\text{for } x < 10h_s) \\ \Delta h &= 1.6 \cdot F^{1/3} u^{-1} \cdot (10h_s)^{2/3} && (\text{for } x \geq 10h_s) \end{aligned} \right\} [5]$$

hvor $F = g \cdot w \cdot (d/2)^2 \Delta T/T_s$

u = middelvindstyrken i utslippshøyden (m/s)

w = utslippshastighet (m/s)

d = skorsteinsdiameter (m)

T_s = røykgasstemperatur (K)

$\Delta T = T_s - T$, hvor T = lufttemperaturen (K)

g = tyngdens akselerasjon (9.81) (m/s²)

Formelen i likning 5 gjelder for instabil og nøytral atmosfære. Under stabile forhold brukes

$$\Delta h = 2.4 (F/(u_p \cdot s))^{1/3} \quad [6]$$

hvor s er en stabilitetsparameter:

$$s = \frac{g}{T} \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad [7]$$

Verdien for den potensielle temperaturgradienten $\left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)$ er for lett stabil atmosfære: 0.02 deg/m, for stabil atmosfære: 0.035 deg/m.

Når varmeoverskuddet i avgassene er lite kan ikke Briggs' formler for røykhevning anvendes.

Formler av typen

$$\Delta h = (A_1 + A_2)/u$$

hvor A_1 henspeiler til effekter av utslippshastigheten og A_2 til varmeoverskuddet, er meget brukt og egner seg bedre til utslipp med lave varmeoverskudd.

Vi vil her bruke Stümkes formel (10)

$$\Delta h = \left(1.5 \cdot w \cdot d + 65 d^{3/2} \left(\frac{\Delta T}{T_s} \right)^{1/4} \right) u^{-1} \quad [8]$$

For sammenlikningens skyld, har en i vurderingene av maksimale konsentrasjoner og skorsteinshøyder også anvendt empiriske overhøydeformler utviklet i Sverige. For nøytrale atmosfæriske forhold angir Bringfelt (11) følgende uttrykk:

$$\text{i avstand 500 m fra utslippet: } \Delta h = 167 \cdot Q_{MW}^{0.36} \cdot u_s^{-1}$$

$$\text{i avstand 1000 m fra utslippet: } \Delta h = 224 \cdot Q_{MW}^{0.34} \cdot u_s^{-1}$$

der Q_{MW} er varmeutslippet (i MW) ($\approx 0.11 \cdot F$) og u_s er vindstyrken ved skorsteinsmunningen (m/s).

4 Skorsteinshøydeberegninger

Ser en bort fra effekten av topografien i ligning [4] står en tilbake med følgende uttrykk for skorsteinshøyden:

$$h_s = H - \Delta h$$

Overhøyden Δh , kan, som vi har sett skrives på formen

$$\Delta h = A \cdot u^{-1} \quad [9]$$

Konstanten A avhenger i første rekke av utslippsbetingelsene; varmeoverskudd og utslippshastighet. Dette kan utnyttes ved beregninger av maksimale bakkekonsentrasjoner og krav til skorsteinshøyder (10).

Ligning [2] for bakkekonsentrasjoner langs røykens akse kan deriveres med hensyn til y for å finne avstanden x_m til maksimal bakkekonsentrasjon χ_m .

$$x_m = \frac{H^2 \cdot q}{b^2 (p+q)} \cdot \frac{1}{2q} \quad [10]$$

$$\text{og } \chi_m = \frac{Q}{\pi \cdot u \cdot a \cdot b} \left(\frac{H^2 \cdot q}{b^2 (p+q)} \right)^{-\left(\frac{p+q}{2q}\right)} \cdot e^{-\left(\frac{p+q}{2q}\right)} \quad [11]$$

Vindhastigheten påvirker såvel overhøyde som spredningen. Den maksimale bakkekonsentrasjon inntreffer ved en kritisk vindhastighet, u_k , som finnes ved å sette

$$\frac{\partial \chi_m}{\partial u} = 0.$$

$$\text{Det gir } u_k = \frac{(p+q)A}{H \cdot q} \quad [12]$$

$$\text{Da } H = h_s + A \cdot u_k^{-1}$$

får vi:

$$H = h_s \cdot \frac{p+q}{p} \quad [13]$$

Fra verdiene gitt fra konstantene a , b , p og q (gitt ovenfor) fremgår det at $p = q$ for alle stabiliteter.

Det gir $H = 2h_s$ og $u_k = \frac{A}{h_s}$

det vil si at den maksimale bakkekonsentrasjon ved den kritiske vindhastigheten inntreffer når overhøyden er lik skorsteinshøyden.

Dette forutsetter at ligning [12] gjelder og at A er vesentlig større enn null.

For $H = 2h_s$ får vi:

$$h_s = \frac{Q}{2\pi A \chi_m} \cdot \frac{b}{a \cdot e} \quad [14]$$

hvor $e = 2.718\dots\dots$

For bestemmelse av skorsteinshøyden er det av avgjørende betydning hvilken modell for røykhevning, og dermed verdi av A , som velges. Det er i beregningene her anvendt forskjellige uttrykk for A avhengig av varmeutslippet (avgass-temperaturen). Forskjellige spredningsparametre er også testet. En har i alle tilfellene funnet at instabil temperatur-sjikting er bestemmende for krav til skorsteinshøyde, under forutsetning av at en ikke tar hensyn til topografiske effekter.