

Kvælstofoxider fra fyringsanlæg

Principper for beregning af skorstenshøjder på fyringsanlæg, hvor udslippet af kvælstofoxider (NO_x) er dimensionerende, f.eks. naturgasfyrede anlæg

Marts 1984

Kvælstofoxider fra fyringsanlæg

67-0 18

Principper for beregning af skorstenshøjder på fyringsanlæg, hvor udslippet af kvælstofoxider (NO_x) er dimensionerende, f.eks. naturgasfyrede anlæg

Marts 1984

MILJØSTYRELSEN
BIBLIOTEKET
STRANDGADE 29
1401 KØBENHAVN K

miljøstyrelsen · Strandgade 29 · 1401 København K · Tlf. (01) 57 83 10



trykt på genbrugspapir

ISBN 87-503-4941-4
Stougaard Jensen/København
Fu 00-238

Indholdsfortegnelse

Sammendrag	5
1. Indledning	7
2. Miljø- og sundhedsmæssige effekter af kvælstofoxider	8
3. Kilder til NO _x -forurening	10
4. Emissionsfaktorer	11
5. Udenlandske emissionsstandarder for NO _x	12
6. Mekanismer ved dannelse af NO ₂	15
7. NO/NO ₂ -koncentrationer i danske byer	16
8. Udenlandske luftkvalitetsstandarder for NO ₂	18
9. Forslag til vejledende immissionskoncentrationsbidrag for NO _x	19
10. Principper for skorstensberegninger	21
11. Røggashastighed	22
12. Beregningseksempler	23
Litteraturliste	27
Appendix: Beregningsforudsætninger	29
Ordliste	31

Sammendrag

Anvendelse af naturgas i fyringsanlæg vil medføre, at emissionen af kvælstofoxider bliver dimensionerende for fastsættelsen af skorstenshøjden.

I de eksisterende vejledninger fra miljøstyrelsen er der ikke taget hensyn til dette forhold, og styrelsen har derfor fundet det hensigtsmæssigt at udsende vejledende retningslinier.

Miljøstyrelsen anbefaler, at man for godkendelsespligtige fyringsanlæg, hvor emissionen af kvælstofoxider bliver dimensionerende for skorstenshøjden, benytter de nomogrammer, der er optegnet i de eksisterende vejledninger, og anvender følgende maksimalt tilladelige immissionskoncentrationsbidrag ($S \times K_s$) for NO_x (beregnet som NO_2):

Frit beliggende virksomheder	0,20 mg/m ³
Byområdets centrale dele	0,12 mg/m ³
Alle andre tilfælde	0,16 mg/m ³ .

Værdierne skal opfattes som ½-times værdier, der højst må overskrides 15 gange pr. måned (1% af tiden).

Samtidig anbefaler miljøstyrelsen, at den hidtidige praksis for beregning af skorstenshøjder på gasoliefyrede anlæg ændres, således at der fremover anvendes samme beregningsprocedure som anbefalet for anlæg, der fyres med gasformig brændsel (bygas, naturgas, LPG).

1. Indledning

I forbindelse med den stigende anvendelse af naturgas til fyringsformål er der konstateret en vis usikkerhed over for, hvorledes skorstenshøjder bør fastsættes i disse tilfælde. De eksisterende vejledninger (*Miljøstyrelsen 1974 og 1976*) omfatter kun beregningsprocedurer for svovldioxid (SO_2) og partikler ($<10\mu$), og naturgas giver kun anledning til ubetydelige emissioner af disse to komponenter.

I lighed med de øvrige fossile brændsler (kul, olie m.m.) medfører forbrænding af naturgas imidlertid en vis emission af kvælstofoxider (NO_x), og denne emission bør efter miljøstyrelsens opfattelse lægges til grund for fastsættelsen af skorstenshøjder af denne type af anlæg.

De anbefalede retningslinier er primært tænkt anvendt i forbindelse med skorstensberegninger på nye godkendelsespligtige fyringsanlæg, hvor der anvendes gasformig brændsel (bygas, naturgas, flaskegas). Afkast fra industriprocesser, der ikke involverer forbrænding, er således ikke omfattet.

Omlægning på eksisterende anlæg fra fyring med kul, fuelolie eller gasolie til gasfyring anses efter miljøstyrelsens opfattelse generelt ikke at medføre øget forurening. En sådan omlægning vil derfor normalt ikke kræve miljøgodkendelse (jfr. miljøbeskyttelsesloven §35). Dette gælder dog ikke, såfremt der samtidig sker en kapacitetsudvidelse, eller såfremt der iøvrigt er specielle forhold, der gør sig gældende, f.eks. i form af meget lave røggastemperaturer.

I samme forbindelse har miljøstyrelsen fundet det hensigtsmæssigt at anbefale en ændret beregningsprocedure for gasoliefyrede anlæg, således at der fremover anvendes ensartede regler for gasolie og gas.

2. Miljø- og sundhedsmæssige effekter af kvælstofoxider

De forekommende kvælstofoxider udgøres i det væsentligste af kvælstofmonoxid (NO) og kvælstofdioxid (NO₂). Summen af NO og NO₂ betegnes ofte NO_x. Kvælstofoxiderne oxideres i atmosfæren til saltpetersyre og bidrager hermed til forurening af nedbøren. På nuværende tidspunkt er det imidlertid uafklaret, hvilken rolle kvælstofoxiderne spiller for de meget omdiskuterede problemer knyttet til forurening af svenske og norske søer og skader på skovområder i Centraleuropa.

For planter gælder det, at selv de mest følsomme kræver forholdsvis høje NO₂-koncentrationer, før skadevirkninger indtræder. Det er en almindelig opfattelse, at de forekommende koncentrationer af NO₂ i Danmark kun medfører ubetydelige effekter på vegetationen.

I en sundhedsmæssig sammenhæng er det vigtigt at være opmærksom på, at NO₂ er langt mere toksisk end NO. Imidlertid giver kvælstofoxiderne også indirekte anledning til skadevirkninger, idet de, under indvirkning af ultraviolet sollys, sammen med fotokemisk reaktive kulbrinter kan indgå i fotokemiske reaktioner, som episodisk kan føre til høje koncentrationer af ozon og andre oxidanter (f.eks. PAN, peroxyacetylnitrat). De fotokemisk reaktive kulbrinter dannes blandt andet ved ufuldstændig forbrænding i bilmotorer.

De luftforurenende stoffer optages hovedsageligt gennem luftvejene. Kvælstofdioxid og ozon er ikke letopløselige i vand, og stofferne absorberes derfor ikke af de fugtige slimhinder i de øvre luftveje, men trænger helt ned i dybeste lungeafsnit.

Oplysninger om kvælstofoxidernes virkninger på mennesker er endnu mangelfulde og usikre. Resultater fra dyreforsøg, humane forsøg og epidemiologiske undersøgelser tyder dog på, at høje koncentrationer af NO₂ giver nedsat lungefunktion og øget risiko for luftvejssygdomme.

Resultater fra dyreforsøg kan ikke direkte overføres til mennesker, men da celletyperne i lungerne hos dyr og mennesker er de samme, anses resultaterne alligevel for at være relevante. I et dyreforsøg med mus udsat for en NO₂-koncentration på 940 µg/m³ i et år, sås en øget modtagelighed for infektion med bakterier, som giver lungebetændelse. I et senere forsøg med mus er der set en påvirkning af enzymsystemet i leveren ved et NO₂-niveau på 470 µg/m³, og i et andet forsøg med mus er der set forandringer i milten ved et NO₂-niveau på 650 µg/m³. Denne påvirkning af andre organer sker, fordi NO₂ føres rundt i kroppen via blodet.

Under et humant forsøg opstod en øget luftvejsmodstand efter en korttidseksponering på 1300 µg/m³. I andre undersøgelser er der først set en effekt ved 4700 µg/m³ eller højere. Subjektivt åndningsbesvær er opstået efter 2 timers eksponering for 1800 µg/m³ hos raske forsøgspersoner og 940 µg/m³ hos astmatikere.

Resultaterne ved epidemiologiske undersøgelser er ikke entydige, da kun nogle af undersøgelserne viser en sammenhæng mellem NO_2 -koncentrationen i luften og øget forekomst af luftvejssymptomer.

En arbejdsgruppe under verdenssundhedsorganisationen (WHO) har, med anvendelse af en sikkerhedsfaktor mellem 3 og 5, anbefalet, at timemiddelværdien af NO_2 holdes under et niveau på $190\text{--}320 \mu\text{g}/\text{m}^3$, således at den valgte værdi kun må overskrides en gang pr. måned.

En uddybning af de miljø- og sundhedsmæssige effekter kan blandt andet findes i *Miljøstyrelsen (1980b, 1982)*, *Statens Vattenfallsverk (1983)* og *WHO (1977)*.

3. Kilder til NO_x-forurening

Fyringsanlæg er ikke den eneste kilde til udslip af kvælstofoxider. Biler giver et væsentligt bidrag, som endvidere må tillægges stor relativ betydning blandt andet på grund af den lave udslipshøjde. (*Miljøstyrelsen, 1980a*).

En kildeopdelte emissionsoversigt for NO_x gældende for året 1980 er vist i tabel 1.

Tabel 1. NO_x-emission i Danmark fordelt på kilder for året 1980 (*Miljøstyrelsen, 1984*)

Kilde	1000 tons (beregnet som NO ₂)	%
Kraftværker	122	48
Trafik	75	30
Industri, bolig og rumopvarmning	56	22
Ialt	253	100

En væsentlig reduktion i NO_x-belastningen nødvendiggør, at også udslippet fra biler reduceres, men denne problemstilling ligger uden for rammerne af nærværende redegørelse.

4. Emissionsfaktorer

Dannelsen af kvælstofoxider ved forbrændingsprocesser sker dels ved reaktion mellem forbrændingsluftens indhold af kvælstof og ilt (termisk- NO_x), dels ved reaktion mellem brændslets indhold af kvælstof og luftens ilt (brændsels- NO_x). Naturgas indeholder dog ikke kvælstof, og det er i dette tilfælde alene den førstnævnte reaktion, der har betydning.

Der er en række faktorer, som påvirker disse reaktioner (f.eks. forbrændingstemperatur, iltkoncentration, brændertype og kedelkonstruktion). Det er derfor ikke muligt at angive præcise tal for, hvilke emissioner der kan forventes alene ud fra kendskab til det anvendte brændsel.

I tabel 2 er givet en række eksempler på gennemsnitlige emissionsfaktorer således, som de er målt på anlæg af forskellig størrelse.

Tabel 2. Gennemsnitlige emissionsfaktorer for NO_x (beregnet som NO_2) fra forskellige fyringsanlæg. (Umweltbundesamt, 1980).

Brændsel	Anlægsstørrelse, MW	Emissionsfaktor		Reference % O_2	
		mg/m ³ n	g pr. MJ		
Naturgas	1–10	170	0,05	3	
	10–25	380	0,10	3	
Fuelolie	1–10	470	0,14	3	
	10–25	650	0,20	3	
	>25	880	0,27	3	
Kul	– Fast rist	1–25	130	0,05	7
		1–10	260	0,11	7
		>10	660	0,27	7
	– Kulstøv	>10			
	– tørt slaggeudtag		850	0,33	6
	– smeltekommerfyret		1500	0,54	5
	– cyklonfyret		2750	~1	–

Der er grund til at pointere, at de angivne værdier er gennemsnitsværdier af målinger foretaget på fyringsanlæg i drift. Der kan derfor forekomme store afvigelser fra de angivne tal. Endvidere må det forventes, at anvendelse af f.eks. »low- NO_x «-brændere eller gasturbiner/gasmotorer vil medføre emissioner, der afviger væsentligt fra tallene i tabel 2.

De angivne værdier skal alene betragtes som orienterende værdier. I forbindelse med konkrete sager bør anvendes givne emissionsgarantier fra brænderfabrikanter, eventuelt suppleret med krav om kontrolmålinger.

5. Udenlandske emissionsstandarder for NO_x

I Holland, Japan, Sverige, Vesttyskland og USA er udarbejdet emissionsstandarder for NO_x-udslip fra fyringsanlæg. Standarderne er umiddelbart vanskelige at sammenligne, dels fordi de er angivet i forskellige enheder, og dels fordi der er anvendt forskellige referencebetingelser.

De fastsatte grænseværdier fremgår af tabel 3. I den følgende tekst er forudsætningerne uddybet nærmere.

Tabel 3. Udenlandske grænseværdier for emission af NO_x (beregnet som NO₂).

Land	Enhed	Kul	Olie	Gas
Holland	g/MJ	0,27	–	–
Japan	ppm	400–480	130–250	60–150
Sverige (forslag)	g/MJ	0,28	–	–
USA	lb/MBTU	0,5–0,7	0,3	0,2
Vesttyskland				
– nye anlæg	mg/m ³ n	800	450	350
– eksisterende anlæg	mg/m ³ n	1300	700	500

Holland:

For kulstøvfyrede anlæg er angivet et tillægskrav for en 24-timers periode, hvor emissionen ikke må overskride 0,19 g/MJ.

Japan:

Værdierne afhænger af anlægsstørrelse og alder. Der er anvendt følgende referenceiltindhold i røggassen:

Kul 6% O₂
 Olie 4% O₂
 Gas 5% O₂

Sverige:

Værdien, som kun omfatter kulstøvfyring, skal opfattes som en månedsmiddelværdi.

USA:

Værdierne gælder kun for anlæg med indfyret effekt større end 73 MW. Der er fastsat forskellige grænseværdier for forskellige kultyper. Endvidere skal man bemærke, at værdierne i USA, i modsætning til andre lande, beregnes på basis af øvre brændværdi.

For kraftværker skal værdierne opfattes som månedsmiddelværdier, mens de for dampgeneratorer skal opfattes som gennemsnit af 3 på hinanden følgende 1-times værdier. Overskridelser tillades under opstart.

Vesttyskland:

Grænseværdierne gælder for kul- og oliefyrede anlæg større end 50 MW og for gasfyrede anlæg større end 100 MW. For kulfyrede anlæg er fastsat lempeligere krav til smeltekommerfyrede anlæg (1800 mg/m³n for nyanlæg og 2000 mg/m³n for eksisterende anlæg).

Der anvendes følgende referencebetingelser for for iltindholdet i røggassen:

- kul
 - tørt slaggeudtag 6% O₂
 - smeltekommerfyret 5% O₂
- olie og gas 3% O₂

Foretages kontinuerlige målinger skal følgende relationer være opfyldt på årsbasis, for at grænseværdierne anses for overholdt:

- samtlige døgnmiddelværdier < grænseværdien
- 97% af alle ½-times værdier < 1,2 × grænseværdien
- samtlige ½-times værdier < 2 × grænseværdien

I tabel 4 er de forskellige landes grænseværdier omregnet til samme enhed. Forudsætningerne for beregningerne fremgår af appendix. Selv om grænseværdierne nu foreligger i samme enheder, skal man være forsigtig med at foretage egentlige sammenligninger, idet forudsætningerne kan være forskellige, således som det fremgår af omtalen af de enkelte lande.

Tabel 4. Udenlandske grænseværdier for emission af NO_x fra nyanlæg.
Enhed: g NO_x (beregnet som NO₂) pr. MJ indfyret effekt.

Land	Kul	Olie	Gas
Holland	0,27	–	–
Japan	0,31	0,09–0,12	0,04–0,09
Sverige	0,28	–	–
USA	0,22–0,31	0,14	0,10
Vesttyskland	0,31	0,14	0,10

I Danmark har en grænseværdi for emission af NO_x fra kraftværker været diskuteret i det såkaldte forsøringsudvalg, som blev nedsat i juni 1982 af den daværende miljøminister. I sin konklusion (*Miljøstyrelsen, 1984*) har udvalget vurderet, at det på nuværende tidspunkt er rimeligt at fastsætte kravet til NO_x -emissionen til maksimalt 0,40 g NO_x (beregnet som NO_2) pr. MJ indfyret effekt, idet værdien er angivet som årsmiddelværdi.

6. Mekanismer ved dannelse af NO₂

Emissionen af kvælstofoxider fra energiproducerende anlæg sker primært i form af NO, som typisk udgør 90–95% af den samlede NO_x-emission. NO₂ udgør resten. I atmosfæren omdannes NO efterhånden til NO₂, dels via reaktion med tilstedeværende ozon, dels ved andre mere komplicerede reaktionsmekanismer afhængig af såvel de atmosfærefysiske som de atmosfærekemiske forhold.

Tæt ved en NO_x-kilde vil den forekommende NO₂-koncentration primært være sammensat af følgende bidrag:

- NO₂ stammende fra baggrundskoncentrationen
- direkte udsendt NO₂
- NO₂ dannet ved reaktion mellem udsendt NO og luftens indhold af ozon, idet denne proces forløber meget hurtigt ($\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$).

Tilstedeværelsen af ozon skyldes blandt andet, at en del af den ozon, som dannes i stratosfæren, under visse meteorologiske forhold transporteres ned i troposfæren. Herudover dannes ozon som tidligere omtalt i forbindelse med fotokemisk aktivitet. De meteorologiske forhold spiller en væsentlig rolle for forekomsten af ozon, og hermed for omdannelse af NO til NO₂. Det er derfor vanskeligt at angive et typisk forhold mellem NO og NO₂ i omgivelsesluften. I byområder vil der normalt være overskud af NO i forhold til ozon, og NO₂-andelen af den samlede NO_x-mængde vil derfor være lille. Efterhånden som luften transporteres bort fra byen vil NO₂-andelen forøges som følge af, at mere og mere NO omdannes til NO₂. Dette medfører omvendt at ozonkoncentrationen i byområder normalt vil være lavere end i landområder.

En nærmere diskussion af de fotokemiske forhold er foretaget i *Miljøstyrelsen (1983)*.

7. NO/NO₂-koncentrationer i danske byer

Der foreligger kun få målinger af NO- og NO₂-koncentrationer i Danmark. Dansk Kedelforening har i en årrække målt NO_x-koncentrationen på 2 målestationer i København. Resultaterne blev opgivet som døgnmiddelværdier.

I første halvdel af 1982 iværksattes det såkaldte landsdækkende luftmåleprogram, som blandt andet indebærer, at luftens indhold af NO og NO₂ følges på 2 målestationer i København og 1 målestation i 6 danske provinsbyer. Alle disse målestationer er opstillet umiddelbart ved trafikerede gader.

I tabel 5 og 6 er vist oversigter over de i 1982 målte værdier af NO og NO₂ baseret på ½-times målinger. Måleperioden har været lidt forskellig for de enkelte stationer afhængig af, hvornår stationen kom i drift, men ligger mellem 8 og 11 måneder.

Tabel 5. Målinger af kvælstofmonoxid (NO) i 7 danske byer i 1982. Midlingstid ½ time. Måleperiode 8–11 måneder. Enhed µg/m³.

Station	Gennemsnit	98%-fraktil	Maks. værdi
København 1	138	481	996
København 2	57	244	993
Næstved	35	156	629
Fredericia	24	101	490
Esbjerg	24	123	504
Randers	41	164	478
Aalborg	88	363	647
Odense	18	92	571

Tabel 6. Målinger af kvælstofdioxid (NO₂) i 7 danske byer i 1982. Midlingstid ½ time. Måleperiode 8–11 måneder. Enhed µg/m³.

Station	Gennemsnit	98%-fraktil	Maks. værdi
København 1	80	163	376
København 2	39	90	170
Næstved	29	65	265
Fredericia	30	66	106
Esbjerg	24	62	115
Randers	30	67	149
Aalborg	31	74	122
Odense	30	67	139

Betragter man en enkelt måned, vil der kunne forekomme højere gennemsnitsværdier og 98%-fraktiler end angivet tabel 5 og 6. F.eks. er der på målestationen København 1 for NO₂ beregnet månedsgennemsnit på 88 µg/m³ og 98%-fraktiler på op til 179 µg/m³.

8. Udenlandske luftkvalitetsstandarder for NO₂

I en række lande er udarbejdet luftkvalitetsstandarder for NO₂. Der er ofte fastsat flere forskellige værdier, angivet ved forskellige referencebetingelser. I tabel 7 er angivet en oversigt over gældende standarder i en række udvalgte lande.

Tabel 7. Luftkvalitetsstandarder for NO₂ i en række udvalgte lande. WHO-grænseværdien gælder for en enkelt måned, i de øvrige tilfælde er den omhandlede periode 1 år.

Midlingstid	Land	Fraktil	Grænseværdi (µg/m ³)
½ time	Vesttyskland	98%	300
1 time	Holland	95%	110
	Holland	98%	135
	EF (forslag) – grænseværdi	98%	200
	– vejled. værdi	98%	135
	WHO	99,86%	190–320
	Holland	99,99%	300
24 timer	Holland	95%	100
	Holland	98%	120
	Holland	99,7%	150
	Japan	maks.	75–113
1 år	Holland	–	50
	USA	–	100
	Vesttyskland	–	80
	EF (forslag) – vejled. værdi	–	50

9. Forslag til vejledende immissionskoncentrationsbidrag for NO_x

Det fremgår af tabel 6, at der ved enkelte målestationer optræder NO_2 -koncentrationer, som ligger tæt ved og i enkelte tilfælde overskrider visse udenlandske grænseværdier angivet i tabel 7.

Miljøstyrelsen finder det derfor væsentligt, at koncentrationen af NO_2 i atmosfæren begrænses, blandt andet ved at der fastsættes et vejledende immissionskoncentrationsbidrag ($S \times K_s$) for den andel, som en enkelt virksomhed må yde til den samlede forurening med NO_2 . I andet regie arbejdes for at få nedsat forureningen fra biler.

Indtil der foreligger en mere detaljeret vurdering af de miljø- og sundhedsmæssige problemer, finder miljøstyrelsen det hensigtsmæssigt at basere en sådan grænseværdifastsættelse på eksisterende udenlandske grænseværdier.

Miljøstyrelsen finder det endvidere hensigtsmæssigt, at de nomogrammer, som findes i de eksisterende vejledninger (*Miljøstyrelsen 1974 og 1976*) indtil videre kan anvendes i forbindelse med beregning af skorstenshøjder.

Nomogrammerne er udarbejdet således, at man under nærmere specificerede meteorologiske forhold kan beregne den maksimale koncentration ved jordoverfladen.

Der er ikke i vejledningerne givet oplysninger om den statistiske forekomst af de valgte meteorologiske data, men i praksis er man gået ud fra, at de beregnede koncentrationer svarer til 99%-fraktiler af ½-timesmiddelværdier gældende for en vilkårlig måned.

Ved fastsættelsen af det maksimalt tilladelige immissionskoncentrationsbidrag ($S \times K_s$) går man normalt ud fra, at en enkelt virksomhed må bidrage med en vis andel (typisk omkring halvdelen) af den acceptable forurening. Eksempler på udenlandske luftkvalitetsstandarder for NO_2 er givet i tabel 7, og i tabel 8 er vist de værdier, som benyttes for det maksimalt tilladelige immissionskoncentrationsbidrag for enkeltkilder i Sverige (forslag) og Vesttyskland for NO_2 og NO_x .

Table 8. Udenlandske værdier for det maksimalt tilladelige immissionskoncentrationsbidrag ($S \times K_s$) af NO_2 og NO_x (beregnet som NO_2). Enhed $\mu g/m^3$.

Land	Komponent	$S \times K_s$	Referencebetingelser
Sverige (forslag)	NO_x NO_2	100–150 25–40	99%-fraktil af 1-times-værdier. – Måleperiode 1 måned.
Vesttyskland	NO_2	150	98%-fraktil af ½-times-værdier. Måleperiode 1 år. Der regnes med at 60% af udsendt NO er omdannet til NO_2 .

I forbindelse med fastsættelsen af en værdi for det maksimalt tilladelige immissionskoncentrationsbidrag for kvælstofoxider kan man beregningsteknisk gå frem på to måder:

- Man kan fastsætte en $S \times K_s$ -værdi for NO_2 , idet der ved beregningen tages hensyn til, at en del af den udsendte NO vil være omdannet til NO_2 , når røgfanen når jorden,
- eller man kan fastsætte en $S \times K_s$ -værdi for den samlede mængde kvælstofoxider (NO_x) beregnet som NO_2 . Denne værdi må så være noget større end en værdi alene omfattende NO_2 .

Miljøstyrelsen finder, at den sidstnævnte metode ud fra et beregningsteknisk synspunkt er den simpleste, blandt andet fordi man herved ikke behøver at have kendskab til forholdet mellem NO og NO_2 , når røgfanen forlader skorstenen.

På baggrund af ovenstående betragtninger samt ud fra en gennemgang af udenlandske grænseværdier foreslår Miljøstyrelsen, at der i forbindelse med skorstensberegninger anvendes følgende maksimalt tilladelige immissionskoncentrationsbidrag ($S \times K_s$) for NO_x (beregnet som NO_2):

Frit beliggende virksomheder	0,20 mg/m^3
Byområders centrale dele	0,12 mg/m^3
Alle andre tilfælde	0,16 mg/m^3

Værdierne skal opfattes som ½-times værdier, der kun må overskrides 15 gange pr. måned (1% af tiden).

10. Principper for skorstensberegninger

Miljøstyrelsen finder det hensigtsmæssigt, at fyringsanlæg, der skal godkendes i henhold til miljøbeskyttelsesloven, underkastes den samme behandling uafhængig af det anvendte brændsel. Man er endvidere af den opfattelse af skorstensberegninger indtil videre bør foretages efter de principper, som er skitseret i miljøstyrelsens vejledning nr. 7/1974 (*Miljøstyrelsen, 1974*).

Ovennævnte betragtninger medfører blandt andet, at nomogrammetoden foreslås anvendt for olie- og gasfyrede varmekærker med indfyret effekt i området 5–300 MW. For gasoliefyrede varmekærker er dette en ændring i forhold til hidtidig praksis, hvor den nedre grænse har været sat til 30 MW, og hvor man for anlæg mindre end denne størrelse har anvendt principper skitseret i miljøstyrelsens vejledning nr. 3/1976 (*Miljøstyrelsen, 1976*).

Den foreslåede ændring skal ses i lyset af den ændring af listen over godkendelsespligtige virksomheder, som blev foretaget i 1978. Ved denne ændring blev den nedre grænse for godkendelsespligtige gas- og oliefyrede varmekærker ændret fra en ydelse på 25 MW (svarende til 30 MW indfyret effekt) til 5 MW indfyret effekt, og det blev herved sikret, at også anlæg i området 5–30 MW blev underkastet en miljømæssig vurdering.

Miljøstyrelsen er herefter af den opfattelse, at man ved fastsættelse af skorstenshøjder på olie- og gasfyrede anlæg bør benytte de principper, som er anført i tabel 9.

Såfremt en træktabsberegning viser, at skorstenen bør være højere end bestemt ved hjælp af nomogrammerne, bliver denne træktabsberegning naturligvis dimensionerende.

Tabel 9. Principper for fastsættelse af skorstenshøjder på gas- og oliefyrede anlæg.

Indfyret effekt, E	Skorstenshøjde
$15 \text{ kW} < E \leq 120 \text{ kW}$	Aftrækssystem og skorstenshøjde bestemmes som angivet i bygningsreglement og gasreglement, afsnit A.
$120 \text{ kW} < E \leq 5 \text{ MW}$	Skorstenshøjden skal være mindst $1,25 \times$ højdeforskellen mellem skorstensfoden og tagryggen på enhver bygning inden for en afstand af 100 m.
$5 \text{ MW} < E \leq 300 \text{ MW}$	Anvendelse af miljøstyrelsens vejledning nr. 7/1974 og nr. 3/1976. For de mindste anlæg forventes træktabsberegningen at blive dimensionerende.
E > 300 MW eller $H_s > 80$ meter	Spredningsmeteorologisk beregning.

11. Røggashastighed

Som hovedregel bør skorstenene dimensioneres således, at røggashastigheden ved laveste normale belastning ikke kommer under 8 m/s .

Såfremt det kan dokumenteres, at det af tekniske årsager kan være vanskeligt at overholde dette krav, bør skorstenens indvendige diameter dimensioneres således, at der opnås så stor røggashastighed som muligt ved maksimal belastning, samtidig med at det nødvendige træk er til rådighed.

Energiproducerende anlæg bør endvidere opbygges således, at de enkelte kedler har separate røgrør.

12. Beregningseksempler

Konsekvenserne af den anbefalede værdi for det maksimalt tilladelige immissionskoncentrationsbidrag for NO_x , er søgt illustreret ved beregning af den nødvendige skorstenshøjde for et fyringsanlæg med en ydelse på 10 MW beliggende i en central del af et byområde og ved anvendelse af forskellige brændsler. Basis for beregningerne fremgår af tabel 10.

Tabel 10. Basis for beregning af skorstenshøjde på fyringsanlæg med en varmeydelse på 10 MW.

		Kul	Fuel-olie	Gas-olie	Naturgas	Husholdn.-affald
Nedre brændværdi	MJ/kg	25	41	43	50	8
Virkningsgrad		0,85	0,85	0,85	0,85	0,65
Svovlindhold	%	1	2,5/1,0	0,5	–	–
Svovlindbinding	%	5	–	–	–	–
Røggasmængde	m^3/kg	10	14	14	14	7
Røggastemperatur	$^{\circ}\text{C}$	110	180	150	100	250
Emissioner						
– partikler	$\text{mg}/\text{m}^3\text{n}$	300	180	–	–	150
– SO_2	$\text{mg}/\text{m}^3\text{n}$	1900	3570/1430	700	–	300
– NO_x (som NO_2)	$\text{mg}/\text{m}^3\text{n}$	800	500	400	300	250
– HCl	$\text{mg}/\text{m}^3\text{n}$	–	–	–	–	600

I tabel 11 er beregnet fortyndingsfaktorer (koncentration i udsendt røggas divideret med maksimal tilladelig koncentration ved jordoverfladen) for partikler, SO_2 , NO_x og HCl ved anvendelse af de forskellige brændsler. Den komponent, som kræver størst fortynding (d.v.s. som har den største fortyndingsfaktor) vil blive dimensionerende for skorstenshøjden. Under de valgte forudsætninger fremgår, at den anbefalede $S \times K_s$ -værdi for NO_x kun vil blive dimensionerende, såfremt der anvendes naturgas som brændsel. For gasolie findes samme fortyndingsfaktor for SO_2 og NO_x . D.v.s. at NO_x med lidt ændrede beregningsforudsætninger kan blive dimensionerende.

Tabel 11. Beregnede fortyndingsfaktorer for fyringsanlæg beliggende i en central del af et byområde.

	$S \times K_S$ (mg/m ³)	Kul	Fuel- olie	Gas- olie	Natur- gas	Husholdn. affald
Partikler	0,06	5000	3000	—	—	2500
SO ₂	0,21	9048	17000/6810	3333	—	1429
NO _x	0,12	6667	4167	3333	2500	2083
HCl	(0,15)	—	—	—	—	4000

I tabel 12 er anført de teoretiske skorstenshøjder (H_S), der beregnes efter nomogrammerne i miljøstyrelsens vejledning nr. 7/1974 (eller nr. 3/1976) under de i tabel 10 givne forudsætninger.

Tabel 12. Beregnede værdier for teoretisk skorstenshøjde (H_S meter) på et fyringsanlæg med en ydelse på 10 MW under anvendelse af forskellige brændsler.

	Kul	Fuel- olie	Gas- olie	Natur- gas	Husholdn.- affald
Partikler	28	17	—	—	15
SO ₂	39	48/28	19	—	8
NO _x	33	21	19	17	13
HCl	—	—	—	—	24

For sammenligningens skyld er i tabel 13 anført beregnet skorstenshøjde og dimensionerende komponent for det betragtede fyringsanlæg med en ydelse på 10 MW.

Tabel 13. Skorstenshøjde og dimensionerende komponent for et fyringsanlæg med en ydelse på 10 MW under anvendelse af forskellige brændsler.

Brændsel	H_S (meter)	Dimensionerende komponent
Kul	39	SO ₂
Fuelolie		
– 2,5% S	48	SO ₂
– 1% S	28	SO ₂
Gasolie (0,5% S)	19	SO ₂ eller NO _x
Naturgas	17	NO _x
Husholdningsaffald	24	HCl

Det fremgår af tabellen, at det kun er ved anvendelse af naturgas, at den anbefalede $S \times K_S$ -værdi for NO_x får betydning for fastsættelsen af skorstenshøjden. Ved mindre ændringer i forudsætningerne for det gasoliefyrede anlæg kan NO_x imidlertid også i dette tilfælde blive dimensionerende (f.eks. såfremt emissionsfaktoren for NO_x for det gasoliefyrede anlæg er større end forudsat eller såfremt svovlindholdet i gasolien er mindre end 0,5%).

Litteraturliste:

- Miljøstyrelsen (1974)*: Begrænsning af luftforurening fra virksomheder. Vejledning nr. 7/1974.
- Miljøstyrelsen (1976)*: Begrænsning af luftforurening fra oliefyrede anlæg. Vejledning nr. 3/1976.
- Miljøstyrelsen (1980a)*: Luftforurening i Danmark. Miljøprojekter nr. 26.
- Miljøstyrelsen (1980b)*: Luftforureningsmæssige konsekvenser af kulfyring på danske kraftværker.
- Miljøstyrelsen (1982)*: Luftforureningsmæssige konsekvenser af kulfyring i mellemstore fyringsanlæg.
- Miljøstyrelsen (1983)*: Fotokemisk luftforurening. Miljøprojekter nr. 45.
- Miljøstyrelsen (1984)*: Miljø og Energi. Rapport fra Forsuringsudvalget.
- Statens Vattenfallsverk (1983)*: Kolets helse- og miljøeffekter, KHM-projekt, slutrapport.
- Umweltbundesamt (1980)*: Materialen 2/80. Emissionsfaktoren für Luftverunreinigung.
- WHO (1977)*: Oxides of Nitrogen, Environmental Health Criteria 4.

Beregningsforudsætninger

Brændselsdata m.m.

Omregning af emissionsfaktorer fra en enhed til en anden forudsætter i visse tilfælde kendskab til forskellige brændselsdata og driftsforhold. Ved de foretagne omregninger er anvendt data som vist i tabel 14.

Tabel 14. Beregningsforudsætninger

	Enhed	Kul	Fuelolie	Naturgas (methan)
Nedre brændværdi	MJ/kg	25	41	50
Øvre brændværdi	MJ/kg	26	43	56
Røggasmængde (tør)	m ³ n/kg	10	14	14
Reference CO ₂	%	13	13	10
CO ₂ , maks.	%	19	17	12

I de tilfælde, hvor emissionsværdier er angivet i enhederne mg/m³n eller ppm, skal samtidig angives ved hvilket luftoverskud, værdierne er gældende. Dette sker normalt i form af en CO₂-% eller en O₂-%. Omregning mellem CO₂-% og O₂-% sker efter følgende formel:

$$\text{CO}_2(\%) = \frac{21 - \text{O}_2(\%)}{21} \cdot \text{CO}_2, \text{ maks. } (\%)$$

CO₂, maks. (%) angiver CO₂-%, når forbrændingen foregår uden luftoverskud.

Sammenhængen mellem emissionsværdier angivet ved forskellig CO₂-% fremgår af følgende formel:

$$\frac{\text{emissionsværdi (1)}}{\text{emissionsværdi (2)}} = \frac{\text{CO}_2(1)}{\text{CO}_2(2)}$$

Omregningsfaktorer

Vægt: 1 lb = 0,454 kg

Energi: 1 kcal = 4,187 kJ = 3,97 BTU
 1 kJ = 0,239 kcal
 1 BTU = 0,252 kcal = 1,055 kJ
 1 kWh = 860 kcal = 3600 kJ

Effekt: 1 MW = 860 Mcal/h = 3600 MJ/h
 1 MJ/h = 0,00028 MW
 1 Mcal/h = 0,00116 MW
 1 GJ/h = 0,28 MW
 1 Gcal/h = 1,16 MW
 1 MBTU = 0,293 MW

Molvægt: NO: 30
 NO₂: 46

Koncentration: 1 ppm NO = 1,34 mg/m³ ved 0° C
 1,23 mg/m³ ved 25° C
 1 ppm NO₂ = 2,05 mg/m³ ved 0° C
 1,88 mg/m³ ved 25° C

Emissioner: 1 g/kcal = 239 g/MJ
 1 lb/MTBU = 0,43 g/MJ

Omregning fra mg/m³n og ppm til mg/MJ indfyret effekt afhænger af det anvendte brændsel. Omregningsfaktorer er vist i tabel 15.

Tabel 15. Omregning fra forskellige enheder til mg/MJ.

	Kul	Fuelolie	Naturgas
1 mg/m ³ n	0,40	0,34	0,28
1 ppm NO ₂	0,82	0,70	0,57
1 lb/MBTU øvre brændværdi	0,45	0,45	0,48

Beregning af skorstenshøjder

Formelgrundlag for miljøstyrelsens nomogrammer:

1. $H_e = 0,44 \times \left(\frac{Q \times 10^3}{S \times K_s} \right)^{0,4444}$
2. $H_e = H_s + 4,42 \times (R \times t \times 10^{-6})^{0,6} \times H_s^{0,15}$

Ordliste

Brændværdi	Et mål for den varmemængde, der frigives ved forbrænding. Der skelnes mellem nedre og øvre brændværdi. Den nedre (effektive) brændværdi angiver den varmemængde, der normalt udnyttes i et fyringsanlæg. Den øvre (kalorimetriske) brændværdi inkluderer den varmemængde der frigives ved kondensation af røggassens indhold af vanddamp.
BTU	»British Thermal Unit«. Varmeenhed der specielt anvendes i USA. (~ 1,055 kJ).
Effekt	I denne rapport et mål for indfyret energimængde pr. tidsenhed. Angives typisk i enheden MW.
Emmission	Udslip til atmosfæren.
Fortyndingsfaktor	Koncentration i røggassen ved skorstensmundingen divideret med koncentrationen ved jordoverfladen.
Fotokemiske oxidanter	Oxiderende kemiske forbindelse der dannes i atmosfæren under indflydelse af sollys f.eks. ved reaktion mellem kulbrinter og kvælstofoxider.
Fraktil	Måleværdi hvorunder en angiven brøkdel af målingerne ligger.
Grænseværdi	Talværdi for den højst tilladelige koncentration af et forurenende stof.
Immission	Koncentrationen af forurenende stoffer i atmosfæren.
Immissionskoncentrationsbidrag	Det bidrag som en given virksomhed yder til tilstedeværelsen af forurenende stoffer i atmosfæren. Det maksimalt tilladelige bidrag betegnes $S \times K_s$.
Kulstøvfyring	Fyringsteknik hvor kullene formales og herefter blæses ind i brænderne på samme måde som ved oliefyring. Der skelnes mellem forskellige former for kulstøvfyring, f.eks. med tørt slaggeudtag, smeltekammerfyring og cyklonfyring.
lb	Pund. Vægtenhed der specielt anvendes i USA (~ 0,454 kg).
Low-NO _x -brænder	Brændertype der medfører reduceret udslip af kvælstofoxider (NO _x).

m^3n	m^3 -normal. Angiver rumfanget af 1 m^3 ved 0°C og 1013 mbar (= 1 atm). I denne rapport refereres i alle tilfælde til tør røggas.
MBTU	Millioner BTU (10^6 BTU).
Middelværdi	Normalt menes aritmetisk middelværdi, der er gennemsnittet af samtlige værdier. I visse situationer anvendes geometrisk middelværdi, der er defineret som antilogarithmen til gennemsnittet af logaritmen til samtlige værdier. I tilfælde af logaritmisk normalfordeling er den geometriske middelværdi lig med 50%-fraktilen (medianen).
Midlingstid	Den tid en enkeltmåling omfatter (f.eks. ½ time, 24 timer, 1 år).
MJ	Megajoule. Varmeenhed (= 239 kcal).
Måleperiode:	Perioden hvorover målinger udføres (f.eks. 1 måned, 1 år).
NO_x	Betegnelse for summen af kvælstofoxider, hvoraf de væsentligste er kvælstofmonoxid (NO) og kvælstofdioxid (NO_2).
Nomogram	Diagram som benyttes til grafisk løsning af indviklede beregningsopgaver. Benyttes f.eks. i forbindelse med bestemmelse af skorstenshøjder.
O_3	Ozon.
Oxidation	Iltning.
Ristefyring	Fyringsteknik hvor kulstykker forbrændes på en rist.
SO_2	Svovldioxid.
Sprednings- meteorologiske beregning	Beregning af luftforureningen ved anvendelse af en spredningsmodel samt meteorologiske og topografiske data.
Standard	Angivelse af det højst tilladelige forureningsniveau for et givet stof. Ud over en egentlig grænseværdi indeholder en standard en beskrivelse af, hvorledes grænseværdien skal måles og anvendes. Der skelnes mellem primære og sekundære standarder. Primære standarder har til formål at beskytte den menneskelige sundhed, mens de sekundære standarder skal beskytte det menneskelige velfærd, hvilket i almindelighed anses at omfatte beskyttelse af flora, fauna, bygningsmaterialer m.m.

ISBN 87-503-4941-4
Stougaard Jensen/København
Fv 00-238
Pris kr. 45.- incl. moms