



Luftforurening fra krydstogtskibe i havn

Af seniorrådgiver Helge Rørdam Olesen og seniorforsker, ph.d Ruwim Berkowicz, Danmarks Miljøundersøgelser

En undersøgelse fra 2003 pegede på, at krydstogtskibe i havn kunne være en alvorlig kilde til luftforurening i de nærliggende havnekarterer. Det var især kvælstofdioxid (NO_2), der var i søgelyset. Undersøgelsen er siden blevet fulgt op af en mere detaljeret analyse for København.

Den ny undersøgelse konkluderer, at krydstogtskibenes bidrag til NO_2 -niveauerne i København er uvæsentligt. Undersøgelsen belyser også forureningen med svovldioxid og partikler fra krydstogtskibene; heller ikke disse stoffer giver nogen særlig anledning til bekymring.

En undersøgelse fra Institut for Miljøvurdering (IMV), der tidligere har været omtalt i *Stads- og Havneingeniøren* (Saxe og Larsen, 2003), pegede på, at krydstogtskibes bidrag til luftforurening i og omkring Københavns Havn kunne være så stort, at grænseværdierne for kvæ-

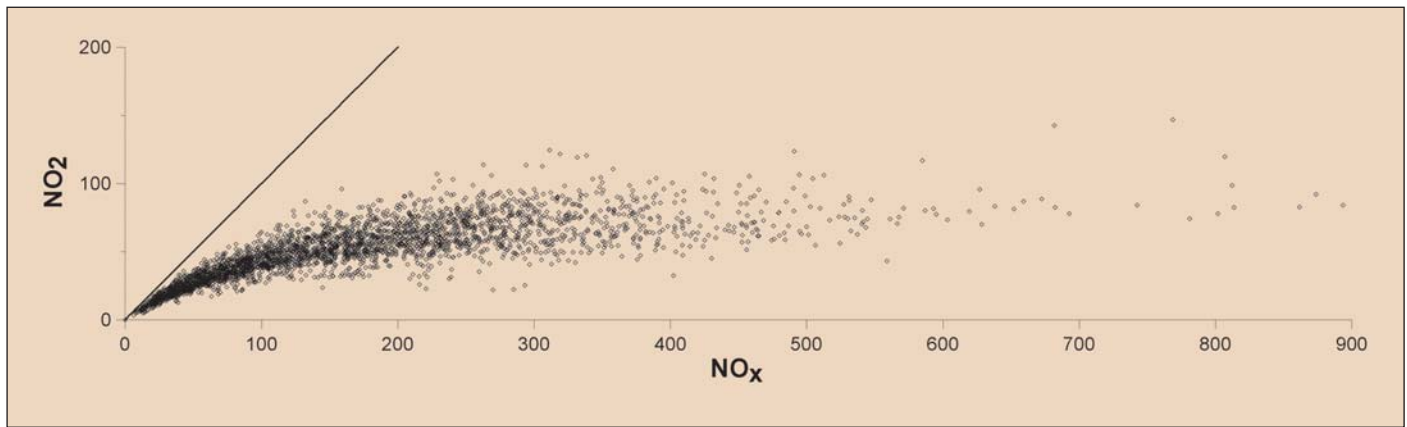
stofdioxid (NO_2), som skal være opfyldt fra 2010, ville blive overskredet.

Miljøstyrelsen iværksatte derfor i 2004 sammen med Miljøkontrollen, Københavns Havn og Copenhagen Malmø Port en undersøgelse af krydstogtskibes forurening. Undersøgelsen er

blevet gennemført af Danmarks Miljøundersøgelser med bistand fra FORCE Technology. Styregruppen for projektet omfattede de ovennævnte institutioner samt IMV. I forhold til den tidligere undersøgelse er der tale om flere væsentlige ændringer i detaljeringsgraden.

For det første er beregningerne i den nye undersøgelse udført eksplicit for NO_2 – ikke blot for NO_x . NO_2 er sundhedsskadeligt, idet det giver nedsat lungefunktion og øger risikoen for luftvejslidelser. Der foreligger således grænseværdier for NO_2 . I forbindelse med beregningerne tages der hensyn til baggrundskoncentrationer af NO og NO_2 samt af ozon, som er afgørende for at omdanne NO til NO_2 . Effekten af atmosfærekemi og baggrundskoncentrationer er dæmpende, når man skal »oversætte« NO_x -emissioner til koncentrationer af NO_2 .

For det andet blev der i den tidligere undersøgelse regnet, som om al emission fra krydstogtskibe var samlet i et punkt. Det blev i nogle sammenhænge antaget, at skibene udledte stofferne over hele året, og for alle krydstogtskibe antog man, at de havde samme fysiske udformning og emissionsforhold. Den nye undersøgelse er mere detaljeret på alle disse punkter. Beregningerne er



Figur 1. Sammenhæng mellem målte koncentrationer af NO₂ og NO_x på Jagtvej i København for samtlige timer i året 1998. Enheden er µg/m³ (regnet som NO₂). En-til-en linjen er indtegnet.

foretaget på grundlag af de skibe, der faktisk anløb havnen i sæsonen 2004. Der er benyttet de bedst tilgængelige oplysninger om enkelte skibes emissioner og fysiske udformning (skorstenshøjde, bygningshøjde, røggastemperatur mv.), samt om skibenes placering ved kaj, deres opholdstid mv.

I øvrigt er denne undersøgelse i modsætning til den tidligere rettet direkte mod at studere effekten af krydstogtskibe. Således omfatter den aktuelle undersøgelse ikke andre skibe i havnen.

Beregningerne er foretaget for NO₂, svovldioxid og partikler, men kun for selve krydstogtskibene – ikke for den trafik på land, skibene afstedkommer.

Undersøgelsen er gennemført ved at der er tilvejebragt detaljeret information om de krydstogtskibe, der anløb Københavns Havn i 2004. Denne del af undersøgelsen blev forestået af FORCE Technology. Derpå har Danmarks Miljøundersøgelser (DMU) udført spredningsmeteorologiske beregninger med den atmosfæriske spredningsmodel OML-Multi.

Det er sket med udgangspunkt i data for emissioner, skibenes fysiske udformning, meteorologi og baggrundskoncentrationer. OML-modellen, der er udviklet ved DMU, blev ligeledes benyttet ved det oprindelige, overslagsmæssige studie. I den ny undersøgelse er der imidlertid gjort brug af modellens evne til at tage hensyn til kemiske omdannelser.

Der er som udgangspunkt udført en »basisberegning« med OML-modellen baseret på en konkret kombination af data og forudsætninger. Basisberegningen udgør et fast holdepunkt, men den alene giver ikke et fyldestgørende billede af forholdene, og den er derfor fulgt op af supplerende beregninger og følsomhedsanalyser.

Miljøstyrelsen har udgivet en rapport, som mere detaljeret beskriver undersøgelsen og dens resultater (Olesen og Berkowicz, 2005).

Ozon-knaphed dæmper NO₂-niveauet

Skal man forstå forholdene omkring NO₂-forurening er det nødvendigt at kende lidt til sammenhængen mellem NO, NO₂ og ozon.

Udstødningsgasser fra forbrændingsmotorer – f.eks. krydstogtskibe – indeholder en blanding af kvælstofoxider (NO_x). Blandingen består hovedsagelig af NO, men er iblandet en mindre procentdel (5-10%) NO₂. Summen af de to komponenter betegnes som NO_x. Når man foretager beregninger, er det lettest at gøre for NO_x. Imidlertid får man kun et klart billede af forholdene ved at skelne mellem NO₂ og NO_x.

Når udstødningsgassen spredes, sker der hurtigt en reaktion, hvor ozon i luften reagerer med NO og danner NO₂:



Reaktionen forudsætter at der er ozon til stede. Koncentrationen af ozon i omgivelserne er derfor afgørende for, hvor meget NO₂ der kan dannes. Under forhold, hvor der udsendes meget NO_x – f.eks. i trafikerede gader – vil luftens ozon blive »brugt op«. Mængden af tilgængelig ozon i luften sætter således et »loft« over, hvor store NO₂-koncentrationer man vil opleve i gaden. Dette fænomen fremgår tydeligt af måledata fra trafikerede gader. Et eksempel er vist i Figur 1, der afbilder sammenhængen mellem koncentrationer af NO₂ og NO_x målt på Jagtvej i København. Af figuren fremgår den vigtige pointe, at man på ingen måde kan sætte lighedstegn mellem koncentrationen af NO_x og koncentrationen af NO₂. Årsagen er ozonen bliver »spist op«, når NO_x-niveauerne er høje.

De foretagne beregninger tager hensyn til disse forhold. OML-modellen indeholder en facilitet, der inddrager kemi, og som tillader beregning af NO₂ ud fra information om baggrundskoncentrationer af NO_x, NO₂ og ozon.

Emissioner fra krydstogtskibe

For at opnå en detaljeringsgrad i beregningerne, der afspejler virkeligheden, er der indhentet oplysninger om samtlige krydstogtskibes anløb i sæsonen 2004 (april-oktober).

Der er tale om 259 anløb af 62 forskellige skibe, fordelt på 15 kajpladser (Figur 2). Den gennemsnitlige varighed af et ophold var 14 timer. Der var 115 kombinationer af skib og kajplads; svarende hertil er OML-beregningerne gennemført for 115 kilder. Det har ganske stor betydning for beregningsresultaterne, at der ikke findes eet skib som emitterer konstant, men derimod et varierende antal skibe med variende emissioner.

For at indhente oplysninger om de enkelte skibes emissionsforhold og fysiske data (motorer, skorstenene, røgrensingsanlæg etc.) har FORCE Technology i samarbejde med Copenhagen Malmø Port udsendt et spørgeskema til rederierne.

Der indkom besvarelser for 24 skibe. Data for de resterende skibe samt øvrige manglende oplysninger har måttet estimeres så godt som muligt. En delrapport beskriver denne del af undersøgelsen (Boje og Wisman, 2004).

Den totale emission af NO_x for sommeren 2004 blev opgjort til 145 ton. Som det fremgår af boksen syner emissionen af NO_x fra krydstogtskibene ikke af voldsomt meget i forhold til andre kilders emission. Skibenes placering centralt i København gør det dog relevant at undersøge om der er lokale problemer.

Bidrag til luftforurening

Undersøgelsens formål var at få indsigt i krydstogtskibenes bidrag til forurening – ikke detaljeret at kortlægge forurenin-



gen fra samtlige kilder i København.

Imidlertid er »bidrag til luftforurening« ikke noget entydigt, veldefineret begreb. Det er naturligt at vurdere en kildes bidrag til luftforurening ved at sammenligne forholdene i en situation, hvor kilden er til stede, med en referencesituation, hvor kilden ikke er til stede. Det afføder dog nogle spørgsmål.

Een komplikation er, at man kan vælge mellem flere forskellige parametre som målestok. Eksempelvis er både årsmiddelværdien og den 19. højeste timeværdi aktuelle i forbindelse med grænseværdier for NO₂. Årsmiddelværdien er lettere at forholde sig til end den 19. højeste timemiddelværdi.

En anden komplikation er, at man skal vælge en referencesituation. Hvis man har et stof, der vekselvirker med andre stoffer - f.eks. netop NO₂ - spiller valget af referencesituation kraftigt ind på resultaterne. Bl.a. må man gøre sig nogle forudsætninger om koncentrationen af ozon i den luftmasse, krydstogtskibene befinder sig i. Hovedudgangspunktet for undersøgelsen har været en luftmasse med samme sammensætning som den generelle baggrundsforurening i byen (målt på taget af H.C. Ørsted-instituttet).

I undersøgelsen er spørgsmålet om bidrag undersøgt ret alsidigt, idet der er benyttet flere forskellige slags »målestok«, og idet der er fortaget analyser af konklusionernes følsomhed over for forskellige valg af forudsætninger. Rapporten om undersøgelsen (Olesen og Berkowicz, 2005) gør grundigt rede herfor. Der er variation i resultaterne afhængigt af forudsætningerne, men hovedkonklusionen forbliver imidlertid den samme.

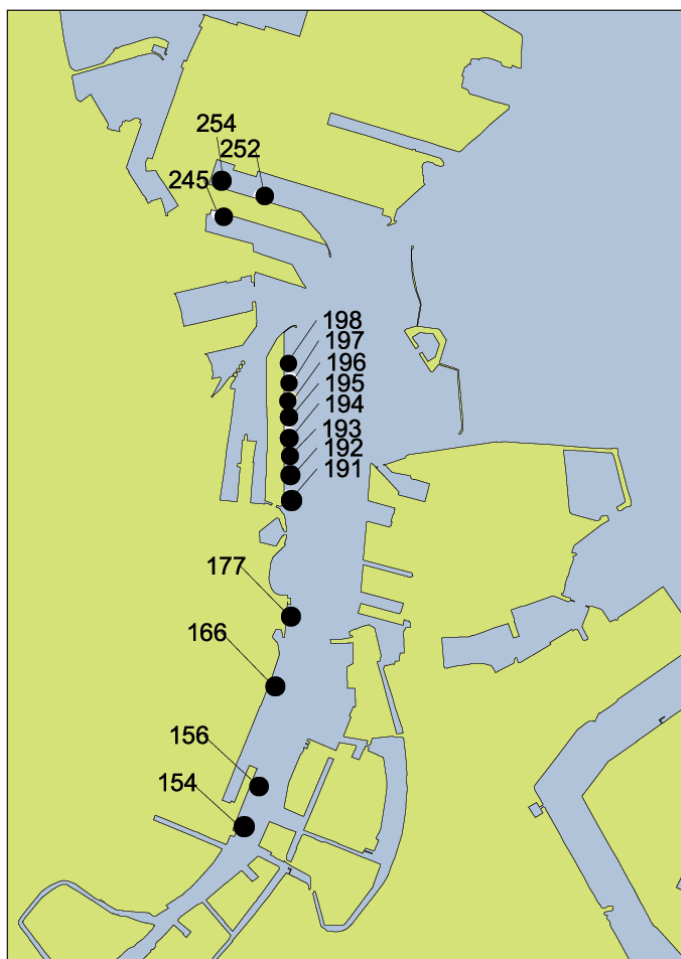
Beregningerne

Der er som udgangspunkt udført en »basisberegning« med OML-modellen baseret på een konkret kombination af data og forudsætninger. Basisberegningen udgør et fast holdepunkt, men dén alene giver ikke et fyldestgørende billede af forholdene, og den er derfor fulgt op af supplerende beregninger og følsomhedsanalyser. Følgende spørgsmål er undersøgt:

- Forskellige forudsætninger om baggrundsconcentrationer;
- Virkningen af at vælge et andet år for meteorologiske data og baggrundsdata;
- Betydningen af forskellige antagelser om, hvor meget NO₂ der emitteres direkte (som andel af NO_x-emissionen);
- Følsomhed over for den geografiske opløsning i beregningerne;
- Betydningen af at tidsforskyde krydstogtskibenes anløb i forhold til øvrige data.
- Forureningsniveauet i normal måle-højde kontra niveauet oppe i en fleretagers bygning.
- Betydningen af røggastemperaturen.

Kvælstofdioxid

Hvad angår kvælstofoxider er der i EU fastsat en grænseværdi for NO₂, som tager udgangspunkt i den 19. højeste timeværdi på et år; denne må ikke overstige 200 mg/m³ (grænseværdien skal være opfyldt senest i 2010). Der findes også en grænseværdi relateret til årsmiddelværdien af NO₂; årsmiddelværdien må ikke overstige 40 µg/m³ (ligeledes senest i 2010).



Figur 2. Kajpladser hvor der i 2004 anløb krydstogtskibe.

Figur 3 viser de mest centrale resultater fra basisberegningen. Figuren kan sammenholdes med grænseværdien for den 19. højeste timeværdi. Figuren viser den geografiske fordeling af den 19. højeste timeværdi af NO₂ i løbet af et år. Der er taget hensyn til krydstogtskibene, overlejret på den generelle baggrundsforurening i byen. Baggrundsconcentrationen antages at være konstant overalt i området. Dermed egner figuren sig til at give et indtryk af krydstogtskibenes bidrag til forureningen, hvori- mod den ikke giver noget detaljeret billede af den totale forurening i enkelte gader. Værdierne ligger i intervallet mellem 98 og 101 mg/m³, og de må som nævnt ikke overstige 200 mg/m³. Såfremt krydstogtskibene ikke havde været til stede, havde figuren vist et konstant niveau på 98 mg/m³, hvilket er koncentrationen fra baggrundsforurening i området.

Hvad angår årsmiddelværdien for NO₂ er der i henhold til basisberegningen et

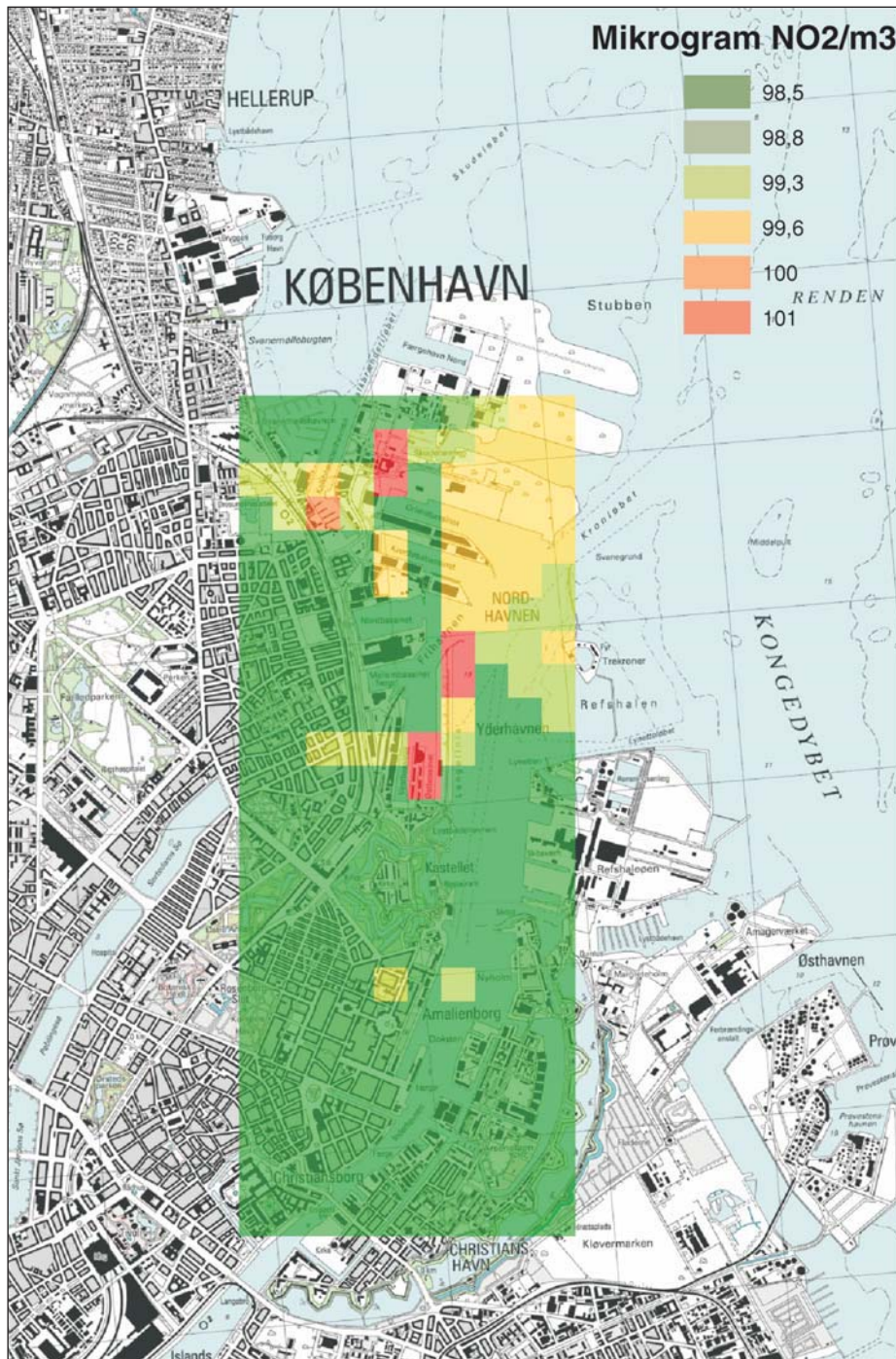
niveau på ca. 23 µg/m³, næsten upåvirket af om krydstogtskibene er tilstede eller ej. Krydstogtskibenes bidrag er kun ca. 0,8 µg/m³, hvor det er størst. Dette skal sammenholdes med en grænseværdi på 40 µg/m³.

Der er gennemført en række supplerende beregninger og følsomhedsanalyser, som belyser betydningen af andre forudsætninger end i basisberegningen. Følsomhedsanalyserne rykker ikke ved det generelle billede, der er tegnet af basisberegningen: At NO₂-bidraget fra krydstogtskibene ikke tilnærmelsesvis er i stand til at løfte koncentrationerne op i nærheden af grænseværdierne for NO₂, hverken lige omkring krydstogtskibene eller længere væk. Tværtimod er bidraget fra krydstogtskibene ubetydeligt sammenholdt med baggrunds niveauet.

Svovldioxid

I tillæg til beregningerne for NO₂ er der gennemført beregninger for forurening med svovldioxid (SO₂) og partikler fra krydstogtskibene. Emissionen af disse stoffer er bestemt på baggrund af emissionsfaktorer og driftsdata.





Figur 3. Kortet giver et billede af krydstogtskibenes bidrag til NO_2 -forureningen i København, når der som målestok benyttes den 19. højeste timeværdi inden for et år. Det farvede område viser niveauerne af NO_2 i henhold til »basisberegningen«. Hver firkant på $200 \times 200 \text{ m}$ repræsenterer et beregningspunkt.

De viste værdier skal sammenholdes med grænseværdien på $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Bemærk at skalaen blot går fra 98 til 101. I det mørkegrønne område er værdien 98, og denne værdi vil vedblive at være 98, uanset om krydstogtskibene er til stede eller ej.

Partikler

Når man skal sætte beregningsresultaterne for partikler ind i en sammenhæng, er det på sin plads med nogle kommentarer om øvrige kilders bidrag til partikelforurening.

Som mål for forureningen med partikler bruges almindeligvis koncentrationen af PM_{10} , dvs. partikler med en diameter på mindre end $10 \mu\text{m}$. Grænseværdien for årgennemsnittet af PM_{10} er sat til $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Det generelle baggrundsniveau i København (målt på taget af H.C. Ørsted Institutet) er på ca. $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ som årgennemsnit.

En meget stor del af denne baggrundsforurening stammer fra andre kilder end de lokale. Den lokale forurening - f.eks. fra biludstødning - »overdøves« i ret stort omfang af forurening udefra, hvis man bruger PM_{10} som målestok.

Bidraget fra trafik i bybaggrunden er ca. $1-2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i årsmiddelværdi. Kun en del heraf skyldes udstødning, mens en væsentlig del stammer fra bremses, vejslid, dækslid samt saltning/grusning.

I henhold til de foretagne beregninger er krydstogtskibenes bidrag til forurening med PM_{10} (regnet som årsmiddelværdi) kraftigst inden for nogle få hundrede meters afstand fra kajpladserne. I disse begrænsede områder beløber bidraget fra krydstogtskibe sig til op imod $0,035 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dvs. under $1/1000$ af grænseværdien. Mængdemæssigt er dette bidrag helt ubetydeligt. For en ordens skyld skal dog tilføjes, at den helbredsmæssige virkning af partikler afhænger af andet end partiklernes masse, bl.a. deres antal og kemiske sammensætning. Vor viden om sundhedseffekten af partikler fra skibsmotorer er mangelfuld, så en mulig sundhedsskadelig effekt af skibenes partikulære emission kan ikke totalt afvises.

Emissionen med SO_2 er overraskende stor, fordi svovlprocenten i krydstogtskibenes brændsel i henhold til det oplyste var mellem 0,19 og 3,2 %. Dette er væsentligt mere end tidligere undersøgelser har peget på. Beregningerne for koncentrationerne i luften viser, at der tæt ved krydstogtskibene er et bidrag på op til $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ regnet som årsmiddelværdi (grænseværdien er $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Det hører imidlertid med til billedet, at der på internationalt plan er vedtaget krav, som inden for de næste få år vil tvinge svovlprocenten i brændslet ned.

NO_x -emission fra udvalgte kilder:

145 ton/år:

Krydstogtskibene i Københavns havn.

Ca. 600 ton/år:

Samtlige skibe i Københavns havn.

Ca. 2.500 ton:

NO_x -emissionen fra Amagerværket i 2003.

Ca. 30.000 ton/år:

NO_x -emissionen fra al trafik i hovedstadsområdet.

Ca. 67.000 ton/år:

Emissionen fra international skibstrafik i Øresund.



Krydstogtskibe ved Langelinie i København.

Konklusion

Alt i alt giver de gennemførte beregninger bl.a. svar på følgende centrale spørgsmål:

- Har krydstogtskibene potentiale til at påvirke den 19. højeste timeværdi af NO_2 ? Svaret er *Ja*, men kun ganske lidt, og kun i den umiddelbare nærhed af kajpladserne – jævnfør Figur 3.
- Er krydstogtskibenes tilstedeværelse i stand til at løfte den 19. højeste timeværdi op over tærsklen på $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$? Svaret er klart *Nej*.

- Er krydstogtskibenes bidrag til den gennemsnitlige NO_2 -forurening på årsbasis væsentligt? Svaret er *Nej*.

Ud over beregningerne for NO_2 er der udført beregninger for forurening med svovldioxid og partikler fra krydstogtskibene.

Disse beregninger godtgør, at krydstogtskibenes bidrag til SO_2 -forurening er større end tidligere antaget – uden dog at være alarmerende – mens bidraget til forurening med partikler er særdeles beskedent set i forhold til EU's grænseværdier.

Referencer

Boje, Jørgen og Tom Wisman, 2004: Emissioner fra krydstogtskibe i Københavns havn. Metoder og antagelser. Indgår som bilag i hovedrapporten af Olesen og Berkowicz.

Olesen, Helge Rørdam og Ruwim Berkowicz, 2005: Vurdering af krydstogtskibes bidrag til luftforurening. Miljøprojekt nr. 978, Miljøstyrelsen. Tilgængelig via www.mst.dk, Udgivelser.

Saxe, Henrik og Thommy Larsen, 2003: Luftforurening fra skibe i danske havne. Stads- og havneingeniøren 9, 5-12.



WebGIS

Intra- og internetløsninger

- nemt og hurtigt

- baseret på alle gængse dataformater

GEOGRAF A/S

Hejrevang 8 · 3450 Allerød · Telefon 4816 6700 · Fax 4816 6701 · geograf@geograf.dk · www.geograf.dk