

Denne artikel er publiceret i det elektroniske tidsskrift

Artikler fra Trafikdage på Aalborg Universitet

(Proceedings from the Annual Transport Conference
at Aalborg University)

ISSN 1603-9696

www.trafikdage.dk/artikelarkiv



Emissioner fra skibe i Københavns Havn i en 5-årig periode fra 2015 til 2019

M. Winther

Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet, Roskilde, Danmark

Emneord: CO₂, NO_x, PM_{2,5}, skibstrafik

Korresponderende forfatter email: mwi@envs.au.dk

Abstrakt

Denne artikel beretter om CO₂, NO_x og PM_{2,5} emissioner fra skibe i Københavns Havn for perioden 2015-2019 beregnet i projektet "Kortlægning af udviklingen i luftforurening fra krydstogsskibe og andre skibe i danske havne" udført af DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi under Aarhus Universitet, for Miljø- og Fødevareministeriet (MFVM).

De største kilder i havnen i alle år er krydstogtskibe, fulgt af tankskibes oliepumpling (losning af olieprodukter), passagerskibe, tankskibe, containerskibe og general cargo. Mindre bidrag beregnes for ro-ro cargo og slæbebåde samt uddybningsfartøjer, bulkskibe, forskningsskibe, offshorefartøjer og flydekraner.

Pr. skibstype i 2019 beregnes følgende resultater for energiforbrug, CO₂, NO_x og PM_{2,5} (procentandele i parentes) for krydstogtskibe (56 %, 57 %, 50 %, 71 %), tankskibes oliepumpling (14 %, 13 %, 18 %, 8 %), passagerskibe (9 %, 9 %, 7 %, 9 %), tankskibe (6 %, 6 %, 8 %, 4 %), containerskibe (5 %, 5 %, 6 %, 3 %), general cargo (5 %, 5 %, 5 %, 2 %), slæbebåde (2 %, 2 %, 1 %, 1 %), ro-ro cargo (1 %, 1 %, 1 %, 0 %) og øvrige skibe (2 %, 2 %, 3 %, 1 %). Øvrige skibe omfatter uddybningsfartøjer, bulkskibe, forskningsskibe, offshorefartøjer og flydekraner.

Udviklingen i CO₂ emissionerne følger udviklingen i energiforbruget. De totale CO₂ emissioner ændrer sig kun lidt i perioden fra 2015 til 2019, men varierer en del fra år til år for de forskellige skibstyper. Fra 2015 til 2019 stiger de samlede CO₂, NO_x og PM_{2,5} emissioner med hhv. 7 %, 5 % og 31 %. De totale emissionsstigninger skyldes især 24 % flere anløb med gradvist større krydstogtskibe i perioden, der i højere grad benytter tung olie og scrubberteknologi. Scrubberen, hvis funktion er at rense røggassen for svovl, er mindre effektiv til at begrænse udledningen af PM_{2,5}. For krydstogtskibe beregnes CO₂[NO_x, PM_{2,5}] emissionsstigninger på 34 % [26 %, 62 %]. For alle andre skibe og olie pumpling falder CO₂[NO_x, PM_{2,5}] emissionerne med hhv. 13 % [8 %, 8 %] og 17 % [15 %, 16 %].

1. Indledning

I et tidligere projekt blev krydstogtskibes bidrag til emissioner og luftkvalitet beregnet for 2017 for de to største danske havne, Københavns Havn og Aarhus Havn (Jensen et al., 2019).

I projektet "Kortlægning af udviklingen i luftforurening fra krydstogtskibe og andre skibe i danske havne" udført af DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi under Aarhus Universitet, for Miljø- og Fødevarerministeriet (MFVM), udvides beregningerne til at omfatte emissioner og luftkvalitet i perioden 2015-2019 for Københavns Havn og Aarhus Havn og inkluderer både krydstogtskibe og øvrige skibe (container-, tank-, bulk-, passager- og ro-ro cargo skibe, slæbebåde m.m.). Der beregnes emissionsresultater for drivhusgasser (kulstofdioxid (CO₂), metan (CH₄) og lattergas (N₂O)) samt de luftforurenende stoffer kvælstofoxider (NO_x) og fine partikler (PM_{2,5}). Projektresultaterne gør det muligt at sammenligne bidragene til emissioner og luftkvalitet for de forskellige skibstyper i de to havne.

Derudover beregnes for den samme periode i projektet emissioner for krydstogtskibe i de fem største danske krydstogthavne, og efterfølgende luftkvalitetsberegninger for de 3., 4. og 5. største krydstogthavne (Skagen, Aalborg, Rønne) vil give værdifuld viden til de berørte havne og kommuner.

Dette paper fokuserer på emissionsopgørelsen for Københavns Havn for perioden 2015-2019 og forklarer emissionsudviklingen for CO₂, NO_x og PM_{2,5} der bruges som input i de senere beregninger af luftkvalitet.

2. Metode

2.1 Aktivitetsdata

Som input til emissionskortlægningen bruges anløbsdata for de enkelte skibe i Københavns Havn for perioden 2015-2019, der indeholder oplysninger om bl.a. skibstype, bruttoton (BT) og ankomst- og afsejlingstidspunkt og placering ved kaj (Hansen, 2020; Nørgaard, 2020).

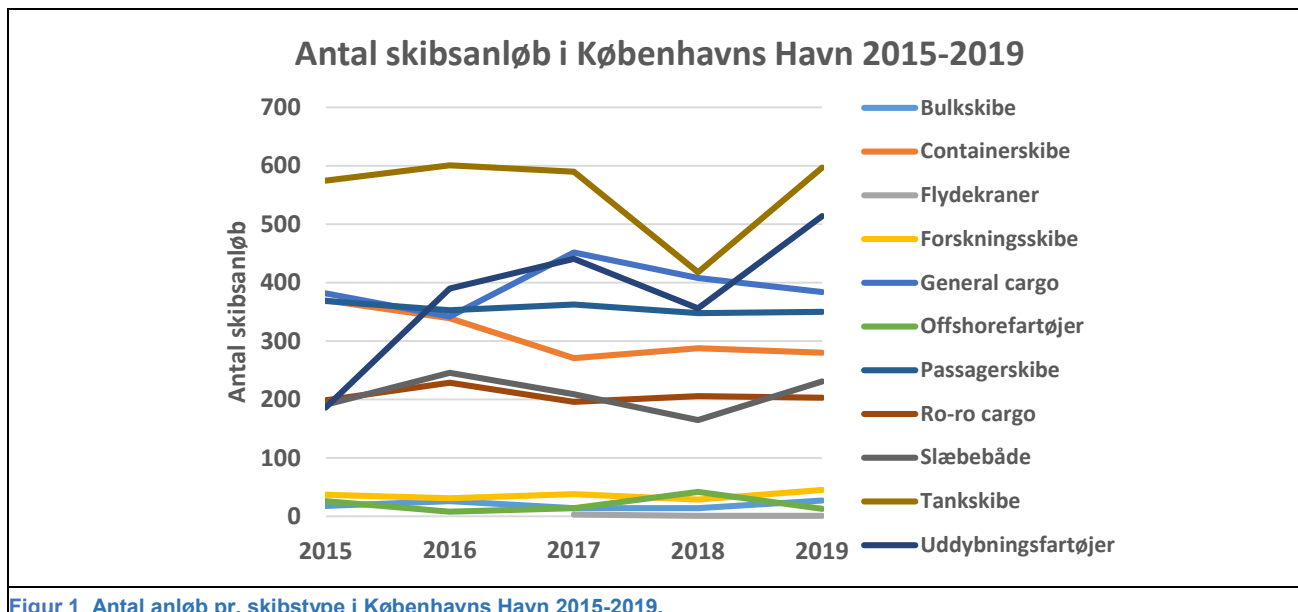
Antal skibsanløb pr. skibstype i Københavns Havn 2015-2019 er vist i Tabel 1 og Figur 1.

Ud over emissionerne fra skibene under manøvrering og ved kaj, er der specifikt for tankskibe et stort energiforbrug og dertil knyttede emissioner fra tankskibenes pumper ved losning af olie i havnen. Kvartalsvis statistik for mængden af lossede olieprodukter i Københavns Havn hentes fra Danmarks Statistik (2020). De lossede mængder af olie for tankskibene (1000 tons) er også vist i Tabel 1 for 2015-2019.

Tabel 1 Antal anløb pr. skibstype og lossede oliemængder (1000 tons) i Københavns Havn 2015-2019.

Skibstype	2015	2016	2017	2018	2019
Bulkskibe	18	26	14	14	27
Containerskibe	370	339	271	288	280
Flydekraner	3		3	1	1
Forskningskibe	37	31	38	29	45
General cargo	382	342	452	408	384
Offshorefartøjer	26	8	14	42	13
Passagerskibe	369	353	363	348	350
Ro-ro cargo	199	229	196	206	203
Slæbebåde	191	246	209	165	231
Tankskibe	575	601	590	418	597
Uddybningsfartøjer	186	390	441	356	514
I alt anløb	2356	2565	2591	2275	2645
Tankskibe – losning (1000 tons olie)	2628	2974	2136	1828	2195

Det samlede antal skibsanløb er steget med 12 % fra 2015-2019, men varierer en del fra år til år for de forskellige skibstyper (Tabel 1 og Figur 1). I alle år er der flest anløb af tankskibe og kun få anløb af forskningsskibe, bulkskibe, offshore fartøjer og flydekraner. I 2019 er der næst flest anløb af uddybningsfartøjer, fulgt af general cargo, passagerskibe, containerskibe, slæbebåde og general cargo.



Figur 1 Antal anløb pr. skibstype i Københavns Havn 2015-2019.

Motorstørrelserne for skibenes hovedmotorer (kW), motortype (2-takt/4-takt), og motorbyggeår pr. skib er oplyst af Danske Rederier (P.W. Kristensen, 2020) ud fra en global skibsdatabase. Hjælpemotorstørrelser estimeres pr. skibstype som funktion af hovedmotorstørrelser ud fra data i SHIP-DESMO modellen (f.eks. Kristensen, 2017). Tidsrum for ophold ved kaj bestemmes ud fra skibenes ankomst- og afsejlingstidspunkt, og data for manøvreringstider i havn er bestemt i dialog med Københavns Havn (Nørgaard, 2020).

Krydstogtskibe bruger i de fleste tilfælde et dieselelektrisk system, hvor 4-takt medium speed dieselmotorer genererer strøm til elmotorer, der bruges både til skibets fremdrift og skibets effektbehov ved kaj. Krydstogtskibe har et stort elforbrug ombord og den nødvendige leverede motoreffekt ved kaj til elproduktion er fundet ved at bruge en relation mellem BT og effektforbrug for krydstogtskibe fra de tidligere emissionsundersøgelser af krydstogtskibe i Københavns Havn (Olesen & Berkowicz, 2005; Jensen et al., 2019). Under manøvrering i havn er 25 % motorbelastning af hovedmotor brugt, der antages at dække krydstogtskibets effektbehov til fremdrift samt elforbrug ombord i denne aktivitetsfase (Olesen & Berkowicz, 2005; Jensen et al., 2019).

Generelt benytter alle andre skibstyper hovedmotorer til fremdrift af skibet og hjælpemotorer til generering af strøm ombord både under manøvrering og ved kaj. Hovedmotorernes motorbelastningsfaktorer er oplyst af Kristensen (2020) og Fragkoulis (2020). Under manøvrering findes hjælpemotorernes leverede effekt for bulk-, container-, general cargo- og tankskibe som funktion af skibets installerede hovedmotoreffekt, ved at anvende en formel opstillet af IMO (2009)¹. For de resterende skibstyper er hjælpemotorernes procentvise motorbelastning oplyst af Kristensen (2020).

Tabel 2 viser manøvreringstider i havn (timer/anløb), samt motorbelastningsfaktorer (%) for hovedmotorer og hjælpemotorer under manøvrering samt hjælpemotorer ved kaj, for opgørelsens forskellige skibstyper.

¹ $P_{\text{Hovedmotor}} < 10000 \text{ kW}$: $P_{\text{Hjælpemotor, leveret}} = 0.05 \cdot P_{\text{Hovedmotor}} \text{ (kW)}$
 $P_{\text{Hovedmotor}} \geq 10000 \text{ kW}$: $P_{\text{Hjælpemotor, leveret}} = 250 + 0.025 \cdot P_{\text{Hovedmotor}} \text{ (kW)}$

Tabel 2 Manøvreringstider i havn (timer/anløb), samt motorbelastningsfaktorer (%) for hovedmotorer og hjælpemotorer under manøvrering samt hjælpemotorer ved kaj, for opgørelsens forskellige skibstyper.

8	Manøvreringstid Timer/anløb	Motorbelastning, manøvrering		Motorbelastning, kaj	
		Hovedmotor (%)	Hjælpemotor (%)	Hovedmotor (%)	Hjælpemotor (%)
Bulkskibe	0,5	10	kW beregnet (IMO formel)	0	25
Containerskibe	0,5	10	kW beregnet (IMO formel)	0	25
Flydekraner	0,5	10	25	0	25
Forskningskibe	0,5	10	25	0	25
General cargo	0,5	10	kW beregnet (IMO formel)	0	25
Krydstogtskibe	0,5	25 % motorbelastning af samlet installeret motoreffekt		Samlet leveret kW, funktion af skibets bruttoton (BT)	
Offshorefartøjer	0,5	10	25	0	25
Passagerskibe	0,5	10	30	0	25
Ro-ro cargo	0,5	10	20	0	25
Slæbebåde	0,5	40	50	0	25
Tankskibe	0,5	10	kW beregnet (IMO formel)	0	25
Uddybningsfartøjer	0,5	10	25	0	25

Skibe der bruger tung olie (HFO: Heavy fuel oil) med højt svovlindhold skal have en scrubber installeret ombord, der reducerer svovl og partikler i skibenes udstødning. Skibe der ikke har en scrubber installeret bruger marin diesel (MDO/MGO: Marine diesel oil/Marine gas oil) eller i meget sjældne tilfælde LNG (Liquified natural gas). Kendskab til hvilke skibe der bruger HFO og scrubber, MDO/MGO eller LNG er en vigtig oplysning til at bestemme de mest præcise emissionsfaktorer for det enkelte skib.

For hvert enkelt krydstogtskib er der kendskab til om skibet har scrubber installeret ud fra data opsamlet i det tidligere krydstogtprojekt (Jensen et al., 2019) og supplerende oplysninger indhentet ved opslag på værfter, rederier m.v. i nærværende projekt.

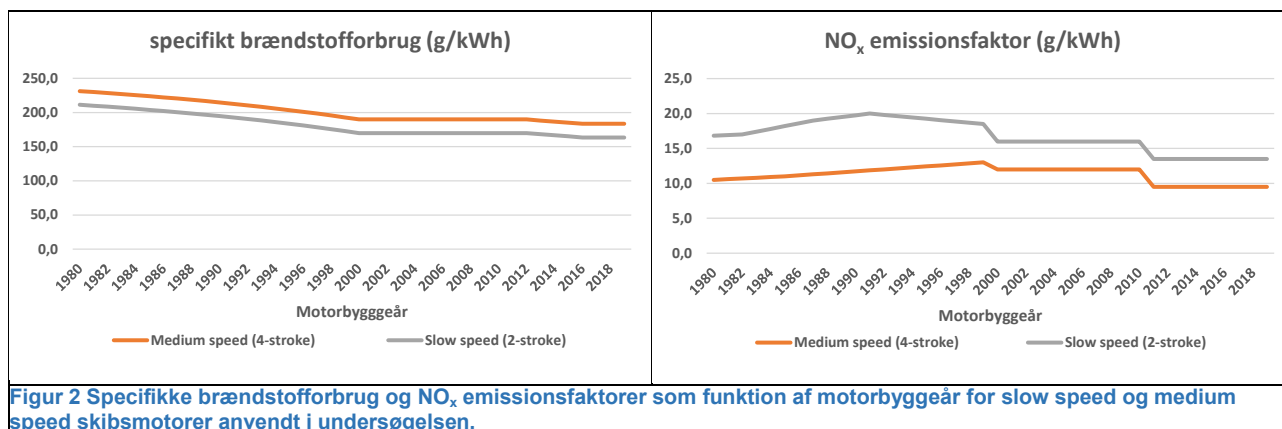
For de øvrige skibstyper vurderes det at kun et fåtal af skibene, der har anløbet Københavns Havn i perioden 2015-2019, har scrubber ombord. Skibe med scrubber ombord og dato for installation er bestemt ud fra en global opgørelse over skibe med scrubber publiceret af Environmental Protection Alliance (<http://epawpweb.azurewebsites.net>) samt dialog med DFDS (Wodall, 2020), Mærsk (Norderud-Poulsen, 2020) og MSC (Fog, 2020) om de konkrete skibe, der har anløbet Københavns Havn.

2.2 Emissionsfaktorer

Figur 2 viser det specifikke brændstofforbrug og NO_x-emissionsfaktoren (g/kWh) som funktion af motorbyggeår for slow speed (2-takt) og medium speed (4-takt) dieselmotorer. Det specifikke brændstofforbrug kommer fra Transportministeriets TEMA2015 model (2015), og NO_x-emissionsfaktorerne er oplyst af MAN Energy Solutions (2012). For LNG (Liquified Natural Gas) bruges en NO_x-emissionsfaktor på 1,5 g/kWh oplyst af Bengtsson et al. (2011) og et specifikt brændstofforbrug på 191,9 g/kWh (Kruse, 2015).

Ved lav motorbelastning og varierende motorbelastning under manøvrering stiger skibsmotorernes specifikke brændstofforbrug (sfc: Specific fuel consumption, angivet i g/kWh) og emissioner. Justeringsfunktionerne er oplyst af IMO (2015) baseret på data fra Starcrest (2013)². Justeringsfaktorerne for sfc, NO_x og PM_{2.5} ved 10 %, 25 % og 40 % motorbelastning fremgår af fodnoten.

² 10 % / 25 % / 40 % motorbelastning: sfc(1,21/1,13/1,07); NO_x(1,22/1,0/1,0), PM_{2.5}(1,38/1,0/1,0)



Figur 2 Specifikke brændstofforbrug og NO_x emissionsfaktorer som funktion af motorbyggeår for slow speed og medium speed skibsmotorer anvendt i undersøgelsen.

PM-emissionsfaktorerne (g/kWh) for diesel kommer fra IMO (2015), og afhænger generelt af svovlindholdet (S %) i brændstoffet og motorens specifikke brændstofforbrug (sfc). Svovlindholdet kendes ikke specifikt for det brændstof skibene bruger i undersøgelsen. I stedet bruges det globale gennemsnit for HFO (2,6 % S) og MDO/MGO (0,08 % S) rapporteret i IMO's årlige måleprogram (se f.eks. IMO, 2018).

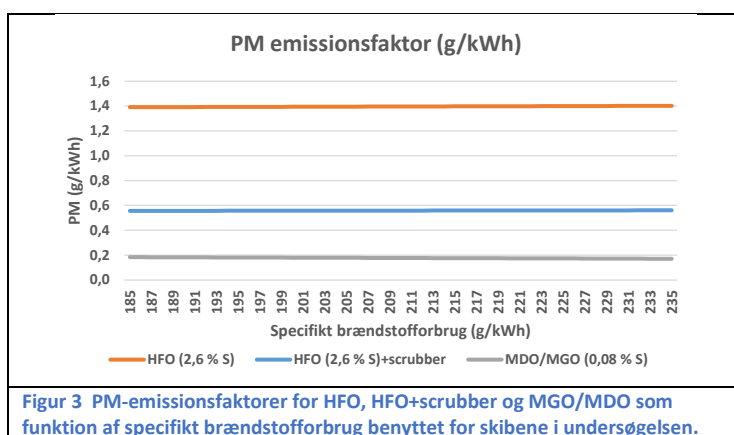
PM-emissionsfaktorerne beregnes på følgende måde for HFO og MDO/MGO:

$$EF_{PM,HFO}(g/kWh) = 1.35 + (sfc \cdot 7 \cdot 0.02247 \cdot (S\% / 100 - 0.0246)) \quad (1)$$

$$EF_{PM,MDO}(g/kWh) = 0.23 + (sfc \cdot 7 \cdot 0.02247 \cdot (S\% / 100 - 0.0024)) \quad (2)$$

Hvor EF_{PM} = PM-emissionsfaktoren (g/kWh), sfc = specifikt brændstofforbrug (figur 2) og S% = svovlprocent i brændstoffet.

Det antages, at PM_{2.5} udgør 98,5 % af samlet PM for HFO og MDO/MGO, baseret på data fra MAN Energy Solutions (2012). For LNG bruges en PM-emissionsfaktor på 0,079 g/kWh oplyst af Bengtsson et al. (2011).



Figur 3 PM-emissionsfaktorer for HFO, HFO+scrubber og MGO/MDO som funktion af specifikt brændstofforbrug benyttet for skibene i undersøgelsen.

Figur 3 viser PM-emissionsfaktorerne beregnet for HFO, HFO+scrubber og MGO/MDO med de anvendte svovlprocenter vist i parentes. Da alle skibe, der bruger HFO som brændstof, som før nævnt har en scrubber ombord, er det kun emissionsfaktoren for HFO+scrubber, der bruges for brændstofftypen HFO i dette projekt. For skibe der bruger scrubber antages en partikelreduktionsfaktor på 60 % bestemt ud fra et litteraturstudie rapporteret i Jensen et al. (2019). Omvendt justeres skibenes effektbehov med et tillæg på 2 % til brug for scrubberens drift (Hansen, 2020).

Som CO₂ emissionsfaktorer for HFO, MDO/MGO og LNG bruges hhv. 78, 74, 56,8 kg/GJ hentet fra Danmarks nationale emissionsopgørelse (se f.eks. Winther, 2020).

2.3 Beregningsmetode

Krydstogtskibe ved kaj

Energiforbruget samt NO_x og PM_{2.5} emissionerne for krydstogtskibene ved kaj beregnes på følgende måde:

$$E_{kaj} = \sum_i T_i \cdot P_{leveret,j} \cdot SF \cdot EF_{k,l,y} \quad (3)$$

Hvor E = energiforbrug/emission, i = anløbsnummer, T = opholdstid ved kaj (timer), P = effektforbrug ved kaj for det enkelte skib (kW, se tabel 2), SF = effektjusteringsfaktor for skibe med scrubber (1,02), EF = faktor for brændstofforbrug/emissioner (g/kWh), j = skibsID, k = brændstoftype, l = motortype, y = motorbyggeår.

Krydstogtskibe under manøvrering

Energiforbruget samt NO_x og PM_{2.5} emissionerne for krydstogtskibene under manøvrering beregnes på følgende måde:

$$E_{manøvrering} = \sum_i T_i \cdot P_{installeret,j} \cdot LF \cdot LAF \cdot SF \cdot EF_{k,l,y} \quad (4)$$

Hvor E = energiforbrug/emission, i = anløb nummer, T = manøvreringstid (timer, se tabel 2), P = total installeret motoreffekt for det enkelte skib (kW), LF = motorbelastningsfaktor (0,25, tabel 2), LAF = transient justeringsfaktor (=1,13), SF = effektjusteringsfaktor for skibe med scrubber (1,02), EF = faktor for brændstofforbrug/emissioner (g/kWh), j = skibsID, k = brændstoftype, l = motortype, y = motorbyggeår.

Øvrige skibstyper ved kaj

Energiforbruget samt NO_x og PM_{2.5} emissionerne for alle andre skibstyper ved kaj findes som:

$$E_{kaj} = \sum_i T_i \cdot P_{installeret,j} \cdot LF \cdot SF \cdot EF_{k,l,y} \quad (5)$$

Hvor E = energiforbrug/emission, i = anløb nummer, T = opholdstid ved kaj (timer, se tabel 2), P = total installeret hjælpemotoreffekt for det enkelte skib (kW), LF = motorbelastningsfaktor (0,25, tabel 2), SF = effektjusteringsfaktor for skibe med scrubber (1,02), EF = faktor for brændstofforbrug/emissioner (g/kWh), j = skibsID, k = brændstoftype, l = motortype, y = motorbyggeår.

Øvrige skibstyper under manøvrering

Energiforbruget samt NO_x og PM_{2.5} emissionerne for hovedmotorer under manøvrering beregnes med (4), hvor P_{installeret} = total installeret hovedmotoreffekt, LF = motorbelastningsfaktor findes i tabel 2 (40 % for slæbebåde, 10 % for alle andre skibe) og LAF = transient justeringsfaktor for energiforbrug og emissioner ved 10 % [40 %] motorbelastning er hhv. 1,21 [1,07] for sfc, 1,22 [1,0] for NO_x og 1,38 [1,0] for PM_{2.5} (se også afsnit 2.2, fodnote 2).

Energiforbruget samt NO_x og PM_{2.5} emissionerne for hjælpemotorer under manøvrering beregnes med (3). Her beregnes P_{leveret} med IMO's beregningsformel for bulk-, container-, general cargo- og tankskibe, og beregnes som produktet af produktet af hjælpemotorstørrelse og motorbelastningsfaktor (P_{installeret} x LF) for de øvrige skibstyper.

Oliepumpning for tankskibe

Ud over emissionerne fra skibene under manøvrering og ved kaj, er der specifikt for tankskibe et stort energiforbrug og dertil knyttede emissioner fra tankskibenes pumper ved losning af olie i havnen. Kvartalsvis statistik for mængden af lossede olieprodukter i Københavns Havn hentes fra Danmarks Statistik

(2020, <https://www.statistikbanken.dk/statbank5a/default.asp?w=1536>). Hjælpeomotorernes effektbehov sættes til 3,5 kWh/tons olie (Oxbøl og Wisman, 2003). De lossede mængder fordeles på de enkelte tankskibe i anløbsdata der angiver losning som aktivitet inden for kvartalet, under hensyntagen til tankskibenes størrelse (BT).

Energiforbruget samt NO_x og PM_{2.5} emissionerne for tankskibenes oliepumpling beregnes på følgende måde:

$$E_{oliepumpling} = \sum_i M_{olie,j} \cdot Q \cdot EF_{k,l,y} \quad (6)$$

Hvor E = energiforbrug/emission (kg), i = anløb nummer, M = oliemængde pumpet (tons), Q = 0,0035 MWh/tons olie = , EF = faktor for brændstofforbrug/emissioner (g/kWh), j = skibsID, k = brændstoftype, l = motortype, y = motorbyggeår.

CO₂ emissioner

CO₂ emissionen beregnes som produktet af energiforbruget og den energirelaterede CO₂ emissionsfaktor:

$$E_{CO_2} = \sum_i E_j \cdot EF_{CO_2,k} \quad (7)$$

Hvor E_{CO₂} = CO₂ emission, E = energiforbrug (GJ, beregnet med formlerne 3-6), EF_{CO₂} = CO₂ emissionsfaktor (kg/GJ), i = anløb nummer, j = skibsID, k = brændstoftype.

3. Resultater

Tabel 3 viser antal anløb og timer i havn for skibe i Københavns Havn i 2019 og de beregnede MWh, energiforbrug (tons og GJ), og CO₂-, NO_x- og PM_{2.5} emissioner, fordelt på skibstyper og aktivitet (manøvrering/ved kaj). Figur 3 viser de samlede energiforbrug og CO₂, NO_x og PM_{2.5} emissioner i Københavns Havn i perioden 2015-2019 fordelt på skibstyper.

De største kilder i havnen i alle år er krydstogtskibe, fulgt af tankskibes oliepumpling (losning af olieprodukter), passagerskibe, tankskibe, containerskibe og general cargo (Tabel 3 og Figur 3). Mindre bidrag beregnes for ro-ro cargo og slæbebåde samt uddybningsfartøjer, bulkskibe, forskningsskibe, offshorefartøjer og flydekraner. De sidste fem skibstyper er lagt sammen i kategorien øvrige skibe i Figur 3 (højre del).

Pr. skibstype i 2019 beregnes følgende resultater for energiforbrug, CO₂, NO_x og PM_{2.5} (procentandele i parentes) for krydstogtskibe (56 %, 57 %, 50 %, 71 %), oliepumpling (14 %, 13 %, 18 %, 8 %), passagerskibe (9 %, 9 %, 7 %, 9 %), tankskibe (6 %, 6 %, 8 %, 4 %), containerskibe (5 %, 5 %, 6 %, 3 %), general cargo (5 %, 5 %, 5 %, 2 %), slæbebåde (2 %, 2 %, 1 %, 1 %), ro-ro cargo (1 %, 1 %, 1 %, 0 %) og øvrige skibe (2 %, 2 %, 3 %, 1 %).

Langt hovedparten af luftforureningen sker ved kaj, og luftforureningen under manøvrering udgør en mindre del (Tabel 3). Det bemærkes, at for manøvrering er andelen af timer mindre end andelen af energiforbrug og emissioner set i forhold til de samlede totaler, pga. det større kW forbrug for skibe ved manøvrering i forhold til kW forbruget ved kaj. Afledt heraf beregnes manøvreringsandele for tidsforbrug, energiforbrug (GJ), CO₂-, NO_x- og PM_{2.5}-emissioner på hhv. 2%, 7%, 7%, 6% og 7% for Københavns Havn i 2019.

Tabel 3 Antal anløb og timer i havn for skibe i Københavns Havn i 2019 og de beregnede MWh, energiforbrug (tons og GJ), og CO₂-, NO_x- og PM_{2,5} emissioner, fordelt på skibstyper og aktivitet (manøvrering/ved kaj).

Aktivitet	Skibstype	Antal anløb	Tid (Timer)	MWh	FC (tons)	FC (GJ)	CO ₂ (tons)	NO _x (tons)	PM _{2,5} (tons)
Manøvrering	Bulkskibe	27	13,5	8,5	1,8	77,7	5,8	0,129	0,002
Manøvrering	Containerskibe	280	140,0	224,5	48,6	2076,7	153,7	3,733	0,051
Manøvrering	Flydekraner	1	0,5	0,1	0,0	1,2	0,1	0,002	0,000
Manøvrering	Forskningsskibe	45	22,5	14,6	3,1	132,2	9,8	0,240	0,003
Manøvrering	General cargo	384	192,0	54,9	13,0	556,7	41,2	0,745	0,012
Manøvrering	Krydstogtskibe	350	175,0	1805,8	395,6	16500,0	1256,2	19,294	0,703
Manøvrering	Offshorefartøjer	13	6,5	4,4	0,9	39,9	3,0	0,070	0,001
Manøvrering	Passagerskibe	350	175,0	704,9	172,1	7193,4	546,6	9,209	0,316
Manøvrering	Ro-ro cargo	203	101,5	151,5	35,6	1519,8	112,5	2,180	0,034
Manøvrering	Slæbebåde	231	115,5	133,1	28,9	1232,7	91,2	1,571	0,023
Manøvrering	Tankskibe	597	298,5	120,5	25,6	1095,1	81,0	1,877	0,027
Manøvrering	Uddybningsfartøjer	514	257,0	49,4	11,2	477,6	35,3	0,892	0,011
Manøvrering	Total	2995	1497,5	3272,2	736,6	30903,0	2336,3	39,941	1,183
Ved kaj	Bulkskibe	27	1387,5	487,6	87,5	3735,3	276,4	7,316	0,089
Ved kaj	Containerskibe	280	3996,1	2583,3	486,0	20750,2	1535,5	37,162	0,465
Ved kaj	Flydekraner	1	158,1	16,2	3,1	133,9	9,9	0,184	0,003
Ved kaj	Forskningsskibe	45	2760,6	758,9	136,1	5813,4	430,2	11,638	0,138
Ved kaj	General cargo	384	10794,5	2320,2	471,1	20115,0	1488,5	27,891	0,409
Ved kaj	Krydstogtskibe	350	4446,4	28120,1	5416,2	225589,0	17210,1	297,528	11,231
Ved kaj	Offshorefartøjer	13	636,2	172,4	31,0	1322,8	97,9	2,697	0,031
Ved kaj	Passagerskibe	350	2431,3	3307,5	716,8	29966,9	2275,6	38,271	1,195
Ved kaj	Ro-ro cargo	203	378,4	174,9	35,3	1507,9	111,6	2,188	0,031
Ved kaj	Slæbebåde	231	11987,3	635,5	129,5	5529,0	409,1	7,404	0,112
Ved kaj	Tankskibe	597	11369,5	3335,7	611,7	26118,4	1932,8	47,237	0,604
Ved kaj	Tankskibe pumpning		7404,0	7682,5	1391,7	59423,6	4397,3	111,545	1,395
Ved kaj	Uddybningsfartøjer	514	2605,7	186,9	37,2	1586,8	117,4	2,688	0,033
Ved kaj	Total	2995	60355,4	49781,8	9553,0	401592,1	30292,4	593,749	15,736
Samlet	Bulkskibe	27	1401,0	496,0	89,3	3813,0	282,2	7,445	0,091
Samlet	Containerskibe	280	4136,1	2807,9	534,6	22826,8	1689,2	40,895	0,516
Samlet	Flydekraner	1	158,6	16,3	3,2	135,1	10,0	0,186	0,003
Samlet	Forskningsskibe	45	2783,1	773,5	139,2	5945,6	440,0	11,878	0,141
Samlet	General cargo	384	10986,5	2375,2	484,1	20671,6	1529,7	28,636	0,421
Samlet	Krydstogtskibe	350	4621,4	29925,9	5811,8	242089,0	18466,3	316,822	11,934
Samlet	Offshorefartøjer	13	642,7	176,8	31,9	1362,7	100,8	2,767	0,032
Samlet	Passagerskibe	350	2606,3	4012,4	888,9	37160,3	2822,2	47,480	1,510
Samlet	Ro-ro cargo	203	479,9	326,3	70,9	3027,7	224,0	4,368	0,065
Samlet	Slæbebåde	231	12102,8	768,6	158,4	6761,6	500,4	8,974	0,135
Samlet	Tankskibe	597	11668,0	3456,2	637,3	27213,5	2013,8	49,114	0,631
Samlet	Tankskibe pumpning		7404,0	7682,5	1391,7	59423,6	4397,3	111,545	1,395
Samlet	Uddybningsfartøjer	514	2862,7	236,3	48,3	2064,4	152,8	3,579	0,044
Samlet	Grand total	2995	61852,9	53053,9	10289,6	432495,1	32628,6	633,691	16,919

Figur 3 Energiforbrug (GJ) og CO₂-, NO_x- og PM_{2.5}-emissioner fra skibe i Københavns Havn 2015-2019 fordelt på krydstogtskibe, andre skibe og tankskibes oliepumpling



Udviklingen i CO₂ emissionerne følger udviklingen i energiforbruget. De totale CO₂ emissioner ændrer sig kun lidt i perioden fra 2015 til 2019, men varierer en del fra år til år for de forskellige skibstyper. Fra 2015 til 2019 stiger de samlede CO₂ emissioner med 7 %. De samlede NO_x og PM_{2.5} emissioner stiger med hhv. 5 % og 31 % i samme periode.

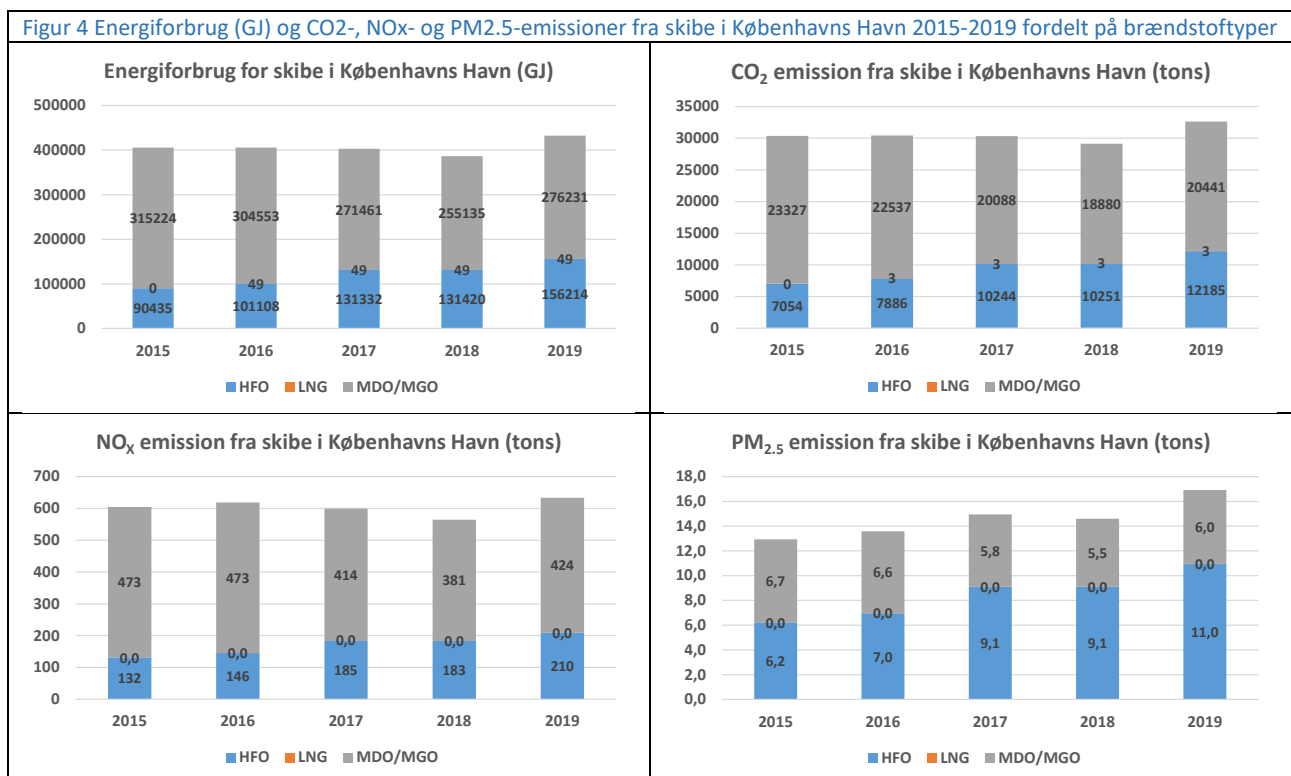
Den samlede stigning i CO₂ emissionerne er især drevet af krydstogtskibenes vækst (Figur 3). Krydstogtskibenes CO₂ emissioner stiger med 34 % i perioden 2015-2019, pga. stigningen i antallet af anløb

med stadig større krydstogtskibe. Omvendt falder CO₂ emissionerne fra "Andre skibe" og oliepumpning med hhv. 13 % og 17 % i perioden.

Stigningen i krydstogtskibenes NO_x emissioner (26 %) er mindre end stigningen i energiforbruget og CO₂ emissionen for krydstogtskibene (Figur 3), fordi krydstogtskibene gennemsnitlig set bliver nyere i perioden og har gradvist lavere NO_x emissionsfaktorer (Figur 2). NO_x emissionerne fra "Andre skibe" og oliepumpning bidrager til den samlede NO_x emissionsudvikling med emissionsfald på hhv. 8 % og 15 % i perioden.

Krydstogtskibenes PM_{2.5} emissioner stiger med 62 % især fordi krydstogtskibenes forbrug af HFO er steget med 90 % i perioden (ikke vist). På trods af at skibe der bruger HFO har scrubber ombord, der renser for SO₂ og reducerer PM emissionerne med omtrent 60 %, er PM_{2.5} emissionsfaktorerne for disse skibe omtrent 3 gange så store som PM_{2.5} emissionsfaktorerne for skibe der bruger MDO/MGO (Figur 2). PM_{2.5} emissionerne fra "Andre skibe" og oliepumpning falder med hhv. 8 % og 16 % i perioden.

Emissionerne fra tankskibes oliepumpning svinger fra år til år afhængig af mængden af olie, der losses i havnen. Emissionerne er størst i 2016 og mindst i 2018, med en forskel på hhv. 63 %, 62 % og 63 % for CO₂, NO_x og PM_{2.5} (Figur 3). Emissionerne fra "Andre skibe" (alle andre skibe end krydstogtskibe, Figur 3), svinger også fra år til år. CO₂[NO_x, PM_{2.5}] emissionerne er størst i 2015 og mindst i 2018, med en forskel på 27 %[22 %, 19 %].



Figur 4 viser de samlede energiforbrug og CO₂, NO_x og PM_{2.5} emissioner i Københavns Havn i perioden 2015-2019 fordelt på brændstoftyper. Den tidligere nævnte samlede stigning i energiforbruget (og CO₂ emissionen) på 7 % fra 2015-2019 dækker over en samlet stigning i forbruget af HFO på 73 % og et samlet fald i MDO/MGO forbruget på 12 %.

I 2019 udgør HFO, MDO/MGO og LNG forbruget hhv. 36 %, 64 % og 0 % af det samlede energiforbrug. De HFO relaterede CO₂, NO_x og PM_{2.5} emissioner udgør hhv. 37 %, 33 % og 65 % af de samlede emissioner i 2019, og for MDO/MGO bliver CO₂, NO_x og PM_{2.5} emissionsandelene hhv. 63 %, 67 % og 35 %.

4. Konklusion

Som inputdata til emissionsopgørelsen for Københavns Havn i perioden 2015-2019 bruges anløbsdata (skibstype, bruttoton (BT) og ankomst- og afsejlingstidspunkt, kajnr.) leveret af Københavns Havn. Derudover benytter beregningerne indsamlede data i projektet for hoved- og hjælpemotorstørrelser, procentvis motorbelastning, manøvreringstid pr. anløb samt teknologispecifikke energiforbrug- og emissionsfaktorer afhængig af brændstoftype og motorbyggeår. Statistik for mængden af lossede olieprodukter fra tankskibe indsamles også i projektet til brug for beregningen af emissioner for denne aktivitet.

Emissionerne beregnes for hvert enkelt skibs hoved- og hjælpemotorer som produktet af motorstørrelse og procentvis motorbelastning (eller leveret motoreffekt), tidsrum (manøvreringstid/opholdstid vej kaj) og emissionsfaktor (g/kWh). Beregningerne tager også hensyn til det forøgede brændstofforbrug og emissioner fra hovedmotorer ved lav motorbelastning under manøvrering, og det ekstra effektbehov til drift af scrubberen for skibe med scrubber ombord,

De største kilder i havnen i alle år er krydstogtskibe, fulgt af tankskibes oliepumpning (løsning af olieprodukter), passagerskibe, tankskibe, containerskibe og general cargo. Mindre bidrag beregnes for ro-ro cargo og slæbebåde samt uddybningsfartøjer, bulkskibe, forskningsskibe, offshorefartøjer og flydekraner.

Pr. skibstype i 2019 beregnes følgende resultater for energiforbrug, CO₂, NO_x og PM_{2.5} (procentandele i parentes) for krydstogtskibe (56 %, 57 %, 50 %, 71 %), tankskibes oliepumpning (14 %, 13 %, 18 %, 8 %), passagerskibe (9 %, 9 %, 7 %, 9 %), tankskibe (6 %, 6 %, 8 %, 4 %), containerskibe (5 %, 5 %, 6 %, 3 %), general cargo (5 %, 5 %, 5 %, 2 %), slæbebåde (2 %, 2 %, 1 %, 1 %), ro-ro cargo (1 %, 1 %, 1 %, 0 %) og øvrige skibe (2 %, 2 %, 3 %, 1 %). Øvrige skibe omfatter uddybningsfartøjer, bulkskibe, forskningsskibe, offshorefartøjer og flydekraner.

Udviklingen i CO₂ emissionerne følger udviklingen i energiforbruget. De totale CO₂ emissioner ændrer sig kun lidt i perioden fra 2015 til 2019, men varierer en del fra år til år for de forskellige skibstyper. Fra 2015 til 2019 stiger de samlede CO₂ NO_x og PM_{2.5} emissioner med hhv. 7 %, 5 % og 31 %. De totale emissionsstigninger skyldes især 24 % flere anløb med gradvist større krydstogtskibe i perioden, der i højere grad benytter HFO og scrubberteknologi. Scrubberen, hvis funktion er at rense røggassen for svovl, er mindre effektiv til at begrænse udledningen af PM_{2.5}. For krydstogtskibe beregnes CO₂[NO_x, PM_{2.5}] emissionsstigninger på 34 %[26 %, 62 %]. For alle andre skibe og olie pumpning falder CO₂[NO_x, PM_{2.5}] emissionerne med hhv. 13 %[8 %, 8 %] og 17 %[15 %, 16 %].

Referencer

- Bengtsson, S., Andersson, K., Fridell, E., 2011: A comparative life cycle assessment of marine fuels: liquefied natural gas and three other fossil fuels, 14 pp., Proc. IMechE Vol. 225 Part M: J. Engineering for the Maritime Environment (DOI: 10.1177/1475090211402136).
- Danmarks Statistik, 2020: SKIB72: Godsomsætning på større danske havne efter havn, retning og godsart, Danmarks Statistiks Statistikbank.
- Jensen, S.S., Winther, M., Løfstrøm, P., Frohn, L.M., 2019. Kortlægning af luftforurening fra krydstogtskibe. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 78 s. - Videnskabelig rapport nr. 316.
<http://dce2.au.dk/pub/SR316.pdf>
- Kristensen, H.O., 2017: Manual for the SHIP-DESMO computer program for exhaust gas emission calculations for container ships, Project no. 2016-108: Update of decision support system for calculation of exhaust gas emissions, Report no. 06, 18s, October 2017
- Fog, 2020: Oplysninger om scrubber installeret ombord på MSC's skibe, tilsendt fra MSC, Dannie Allermann Fog.
- Fragkoulis, 2020: Oplysninger om motorbelastning for slæbebåde, personlig kommunikation, Evangelos Frangkoulis, Svitzer.
- Hansen, 2020: Anløbsdata 2015-2019 for krydstogtskibe tilsendt fra Københavns Havn, Verner Biener Hansen.
- Hansen, 2020: Personlig kommunikation, Jens Peter Hansen, ECA engineering.
- Kristensen, 2020: Oplysninger om motorbelastning for hjælpemotorer, personlig kommunikation, Hans Otto Kristensen, HOK Marineconsult.
- IMO, 2009: Interim guidelines on the method of calculation of the energy efficiency design index for new ships, MEPC.1/Circ.681, , IMO Marine Environment Protection Committee.
- IMO, 2015: Third IMO GHG Study 2014, Smith, T.W.P., Jalkanen, J.P., Anderson, B.A., Corbett, J.J., Faber, J., Hanayama, S., O'Keefe, E., Parker, S., Johansson, L., Aldous, L., Raucci, C., Traut, M., Ettinger, S., Nelissen, D., Lee, D.S., Ng, S., Agrawal, A., Winebrake, J.J., Hoen, M., Chesworth, S. & Pandey, A., 2015: International Maritime Organization, (IMO) London, UK, April 2015. Available at:
<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/ThirdGreenhouseGasStudy/GHG3ExecutiveSummaryandReport.pdf>
- IMO, 2018: Air pollution and Energy Efficiency – Sulphur monitoring for 2018, IMO Marine Environment Protection Committee.
- Kruse, C., 2015: Data tilsendt fra Samsø Rederi.
- MAN Energy Solutions, 2012: Data tilsendt af Michael Finch Petersen, Low Speed Marine R&D, (tidligere MAN Diesel & Turbo), København.
- Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Thomsen, M., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H.G., Johannsen, V.K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Callesen, I., Caspersen, O.H., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S.B., Olsen, T. M. & Hansen, M.G. 2020. Denmark's National Inventory Report 2020. Emission Inventories 1990-2018 - Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 900 pp. Scientific Report No. 372 <http://dce2.au.dk/pub/SR372.pdf>.
- Norderud-Poulsen, 2020: Oplysninger om scrubber installeret ombord på Mærsk's skibe, tilsendt fra Mærsk, Anne Norderud-Poulsen.
- Nørgaard, 2020: Anløbsdata 2015-2019 for andre skibe end krydstogtskibe tilsendt fra Københavns Havn, Gert Nørgaard.
- Olesen, H.R., Berkowicz, R.B., 2005: Vurdering af krydstogtskibes bidrag til luftforurening. Miljøprojekt Nr. 978, 2005. Miljøstyrelsen.
- Oxbøl, A., Wismann, T., 2003: Emissioner fra skibe i havn, Arbejdsrapport nr. 11 fra Miljøstyrelsen, 62 pp.
- Starcrest, 2013: Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions – 2012. Available at:
http://www.portoflosangeles.org/pdf/2012_Air_Emissions_Inventory.pdf
- Transportministeriet, 2015: TEMA2015 - et værktøj til at beregne transporters energiforbrug og emissioner i Danmark. Teknisk rapport, 126 pp.
- Woodall, 2020: Oplysninger om scrubber installeret ombord på DFDS færger, personlig kommunikation, Paul Woodall.
- Winther, M., 2020: Danish emission inventories for road transport and other mobile sources. Inventories until the year 2018. National Environmental Research Institute, University of Aarhus. DCE Scientific Report (to be published).