KORTLÆGNING AF UDVIKLINGEN I LUFTFORURENING FRA KRYDSTOGTSKIBE OG ANDRE SKIBE I FEM DANSKE HAVNE

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 413 2021

AARHUS
UNIVERSITET
DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

KORTLÆGNING AF UDVIKLINGEN I LUFTFORURENING FRA KRYDSTOGTSKIBE OG ANDRE SKIBE I FEM DANSKE HAVNE

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 413 2021

Steen Solvang Jensen
Morten Winther
Per Løfstrøm
Matthias Ketzel
Lise M. Frohn

Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet

AARHUS
UNIVERSITET
DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 413
Kategori:	Rådgivningsrapport
Titel:	Kortlægning af udviklingen i luftforurening fra krydstogtskibe og andre skibe i fem danske havne
Forfattere:	Steen Solvang Jensen, Morten Winther, Per Løfstrøm, Matthias Ketzel, Lise M. Frohn
Institution:	Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	7. januar 2021
Redaktion afsluttet:	December 2020
Faglig kommentering:	Camilla Geels, Institut for Miljøvidenskab
Kvalitetssikring, DCE:	Vibeke Vestergaard Nielsen
Sproglig kvalitetssikring:	Vibeke Vestergaard Nielsen
Ekstern kommentering:	Odense Kommune har kommenteret på rapporten http://dce2.au.dk/pub/komm/SR413_komm.pdf
Finansiel støtte:	Miljøministeriet
Bedes citeret:	Jensen, S.S., Winther, M., Løfstrøm, P., Ketzel, M., Frohn, L.M. 2021. Kortlægning af udviklingen i luftforurening fra krydstogtskibe og andre skibe i fem danske havne. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 129 s. - Videnskabelig rapport nr. 413. http://dce2.au.dk/pub/SR413.pdf

Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse

Sammenfatning: Rapporten beskriver anløb af krydstogtskibe og andre skibe i fem danske havne i perioden 2015-2019 og de tilhørende emissioner. Med OML-modellen er det beregnet, hvor meget krydstogtskibene og andre skibe bidrager til luftkvaliteten i nærområderne af skibene. De fem havne er Københavns Havn, Aarhus Havn, Aalborg Havn, Skagen Havn og Rønne Havn.

Emneord:	Emission, luftkvalitet, krydstogtskibe, andre skibe, danske havne.
Layout:	Majbritt Ulrich
Foto forside:	Colourbox
ISBN:	978-87-7156-546-1
ISSN (elektronisk):	2244-9981
Sideantal:	129
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som http://dce2.au.dk/pub/SR413.pdf

Indhold

Forord **5**

Sammenfatning **6**

Formål og baggrund 6
Undersøgelsen 6
Hovedkonklusioner 7

1. Metode og datagrundlag **12**

1.1 Kortlægning af skibe i danske havne 12
1.2 Emissionsfaktorer og fysiske parametre til luftkvalitetsberegninger 12
1.3 Krydstogtskibe og øvrige skibes påvirkning af luftkvaliteten i fem havne 12

2. Anløb af skibe **16**

2.1 Anløb af skibe i Københavns Havn 16
2.2 Anløb af skibe i Aarhus Havn 19
2.3 Anløb af krydstogtskibe i Aalborg, Skagen og Rønne Havn 22

3. Placering af krydstogtskibe og andre skibe i beregningsområder **23**

3.1 Placering af kajpladser i de fem havne 23
3.2 Beregningsområder i de fem havne 27

4. Emissioner fra skibe **32**

4.1 Hoved- og hjælpemotorstørrelser, motorbelastningsfaktorer og tidsrum for manøvrering og kajophold 32
4.2 Specifik energiforbrug og emissionsfaktorer 37
4.3 Beregningsmetode for energiforbrug og emissioner 39
4.4 Energiforbrug og emissioner 39
4.5 Energiforbrugsrater og emissionsrater for NO_x og $PM_{2,5}$ 59
4.6 Fysiske parametre 59

5. Påvirkning af luftkvaliteten i de fem havne **62**

5.1 Beregningsår 62
5.2 Oversigt over påvirkning af luftkvaliteten i de fem havne 63
5.3 Københavns Havn 65
5.4 Aarhus Havn 72
5.5 Aalborg Havn 79
5.6 Skagen Havn 82
5.7 Rønne Havn 85
5.8 Sammenligning med andre undersøgelser 88
5.9 Usikkerhed på modelberegningerne 90

Referencer **92**

Bilag 1 Liste med anløb af skibe i havnene 96

Bilag 2 Anløb og emissioner pr. mdr. 97

Bilag 3 Hovedmotor- og hjælpemotoreffekter som funktion af Bruttoton 121

Bilag 4 Anløb, energiforbrug og emissioner i Københavns Havn for 2015 til 2018 125

Bilag 5 Emissionsrater og fysiske parametre for alle anløb 126

Bilag 6 Beregningsmetode for energiforbrug og emissioner 127

Forord

Miljøministeriet har anmodet DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi under Aarhus Universitet om en faglig vurdering af udviklingen i emissioner fra krydstogtskibe og øvrige skibe, og hvordan de påvirker luftkvaliteten i og omkring København Havn, Aarhus Havn, Aalborg Havn, Skagen Havn og Rønne Havn.

Opgaven er afgrænset til at belyse emissionsudviklingen for en femårig periode (2015-2019), og påvirkning af luftkvaliteten er kun beregnet for et enkelt år (2019). Krydstogtskibes påvirkning af luftkvaliteten er belyst for alle 5 havne, mens påvirkningen af luftkvaliteten pga. krydstogtskibe og øvrige skibe kun er gennemført for Københavns Havn og Aarhus Havn, som er de to største havne. På denne måde vil det være muligt at belyse betydningen af krydstogtskibes emission til luftkvaliteten i forhold til andre skibes emission til luftkvaliteten i disse to havne.

For at kunne belyse hvordan krydstogtskibe påvirker luftkvaliteten i de fem havne og øvrige skibe tillige i Københavns Havn og Aarhus Havn, er der blevet indsamlet detaljerede oplysninger om de enkelte skibe for perioden 2015-2019. Disse oplysninger omfatter emissionsforhold, deres placering i havnene, og hvornår de er i havnene. Endvidere er indsamlet oplysninger om fysiske parametre fx skorstenshøjder på skibene. HOK Marineconsult ApS har bidraget med data for skorstenshøjder på øvrige skibe. Ud fra disse oplysninger er der gennemført luftkvalitetsberegninger af, hvordan luftkvaliteten påvirkes af krydstogtsskibene og øvrige skibe. Disse beregninger fokuserer på luftkvaliteten i nærområderne af havnene, herunder i forskellige højder for at belyse eksponering af etagebyggeri. Boligbyggeri og andet byggeri er generelt i fremvækst i havneområderne.

Da COVID-19-pandemien først ramte Danmark i det tidlige forår 2020, er den beskrevne emissionsudvikling fra 2015-2019 ikke påvirket heraf, men COVID-19-pandemien har på dramatisk vis påvirket turismen med krydstogtskibe i 2020.

Projektet har været fulgt af en følgegruppe bestående af:

Christian Hald-Mortensen, Miljøministeriet (formand)

Per Winther Christensen, Danske Rederier

Boris Schuleit, Aarhus Kommune

Michael Brandt-Bernbom, Bornholms Regionskommune

Mikkel Krogsgaard Niss, Københavns Kommune

Søsser Lund, Aalborg Kommune

Jette Brønnum, Frederikshavn Kommune

Steen Solvang Jensen, DCE

Morten Winther, DCE

Per Løfstrøm, DCE

Sammenfatning

Formål og baggrund

Formålet med denne rapport er at vurdere udviklingen i skibsanløb og emission fra krydstogtskibe og andre skibe i udvalgte danske havne for perioden 2015-2019, og hvilken betydning det har for luftkvaliteten. For hele perioden er anløb og emissioner belyst for krydstogtskibe i Københavns Havn, Aarhus Havn, Aalborg Havn, Skagen Havn og Rønne Havn, som er de fem største havne for krydstogtskibe i Danmark. For Københavns Havn og Aarhus Havn er tillige belyst udviklingen i emissioner til luften for andre skibe. Hvordan skibene påvirker luftkvaliteten i nærområderne er belyst gennem modelberegninger for 2019, som vurderes at være et repræsentativt meteorologisk år, og som samtidig repræsenterer de seneste emissionsforhold.

DCE har tidligere gennemført et projekt for Miljøministeriet omkring Kortlægning af luftforurening fra krydstogtskibe i København og Aarhus (Jensen et al., 2019). Den tidligere rapport omhandlede kun krydstogtskibe, kun Københavns Havn og Aarhus Havn, og kun emissioner og luftkvalitet i 2017. Nærværende rapport ser på udviklingen i anløb og tilhørende emissioner over en 5-årig periode for fem havne, luftkvaliteten fra krydstogtskibe i fem havne samt luftkvaliteten for krydstogtskibe og andre skibe i to havne. Som noget nyt inddrager denne undersøgelse også drivhusgasser. Dette er relevant i forhold til den nationale målsætning om 70% reduktion i drivhusgasser i 2030.

Undersøgelsen

Som input til emissionsberegningerne bruges anløbsdata for de enkelte skibe i Københavns Havn og Aarhus Havn for perioden 2015-2019, der indeholder oplysninger om bl.a. skibets navn, skibstype, IMO kode, vægten i bruttoton (BT) og ankomst- og afsejlingstidspunkt, havneområde og kajnummer. For Aalborg Havn, Skagen Havn og Rønne Havn indhentes samme type anløbsdata, men kun for krydstogtskibe for perioden 2015-2019.

Til emissionsberegningerne for tankskibes pumpeaktivitet ved losning af olie i Københavns Havn og Aarhus Havn indhentes statistik for mængden af lossede olieprodukter fra Danmarks Statistik.

Til brug for den rumlige fordeling af emissionerne er kajpladsernes placering digitaliseret ud fra kort leveret af havnene.

En lang række yderligere parametre for skibene og deres aktiviteter er indhentet i projektet for at kunne fastlægge brændstofforbrug og emissionsfaktorer og dermed bestemme emissionen præcist. Motorstørrelserne for skibenes hovedmotorer, motortype, og motorbyggeår pr. skib er oplyst af Danske Rederier ud fra en global skibsdatabase. Hjælpemotorstørrelser estimeres pr. skibstype som funktion af skibenes bruttotons ud fra data i den danske SHIPDESMO - model. Tidsrum for ophold ved kaj bestemmes ud fra skibenes ankomst- og afsejlingstidspunkt, og data for manøvreringstider i havn er bestemt i dialog med de enkelte havne. Ligeledes er en række fysiske parametre som f.eks. overbygningshøjde og skorstenshøjde over vandlinje (funktion af bruttotons), volumenstrøm og røggastemperatur indhentet pr. skibstype i dette projekt.

På baggrund af emissionsopgørelsen og de fysiske parametre er der gennemført luftkvalitetsberegninger for 2019 med OML-modellen i de fem havne. Ud over emissionen indgår meteorologisk data og baggrundskoncentrationen også i OML-beregningerne. Luftkvalitetsberegninger er gennemført for et finmasket net for hver havn for at belyse, hvordan skibene påvirker luftkvaliteten i nærområderne. Den geografiske opløsning er 100 m x 100 m i Københavns Havn, og 50 m x 50 m i de øvrige havne. Beregninger er gennemført for årsmiddelværdien af NO_2 (kvælstofdioxid) og $PM_{2,5}$ (massen af partikler under 2,5 mikrometer) samt for spidsværdier repræsenteret ved den 19. højeste timeværdi for NO_2. Årsmiddelværdien er gennemsnitsværdien over et år, og beregnet som gennemsnittet af alle timer over et år. Den 19. højeste timeværdi er den 19. højeste beregnet koncentration blandt alle beregnede koncentrationer for hver time over et år. Det pågældende år er i dette tilfælde 2019. Disse indikatorer er valgt, da der er knyttet helbredseffekter til udsættelser for disse stoffer, og forbi der er opstillet grænseværdier for dem (EU, 2008). Den geografiske variation i koncentrationerne er visualiseret som iso-kurver på luftfotos.

Koncentrationsbidraget fra skibene er desuden beregnet i forskellige højder i de fem havne for at vurdere eksponeringen af fx etagebyggeri. Beregningerne er foretaget i følgende højder: 25 m, 50 m og 70 m.

I beregningerne er der endvidere taget hensyn til bygningseffekter, som er tilstødende bygningers indflydelse på spredningsforholdene.

Hovedkonklusioner

Skibsanløb i de fem havne

I 2019 har Aarhus Havn flest skibsanløb med i alt 5.946 anløb. En meget stor del er Molslinjens passagerskibe, som udgør 3.728 anløb. Der er kun 32 anløb af krydstogtskibe. Københavns Havn har næst flest skibsanløb med 2.995, og er den største havn for krydstogtskibe med 350 anløb, men har relativt få passagerskibe (samme antal som krydstogtskibe dvs. 350). I 2019 har Rønne, Skagen og Aalborg hhv. 44, 41 og 32 anløb af krydstogtskibe. Antallet af anløb af krydstogtskibe er således omtrent på det samme niveau i havnene i Aarhus, Rønne, Skagen og Aalborg, mens det er omkring 10 gange højere i Københavns Havn.

Ses på udviklingen i antal anløb, så er det samlede antal skibsanløb i Københavns Havn steget med 14% fra 2015-2019, men varierer en del fra år til år for de forskellige skibstyper. I alle år er der flest anløb af tankskibe og kun få anløb af forskningsskibe, bulkskibe, offshorefartøjer og flydekraner. I 2019 er der næst flest anløb af uddybningsfartøjer, fulgt af general cargo, passagerskibe, krydstogtskibe, containerskibe, slæbebåde og ro-ro cargo. Antal anløb af krydstogtskibe er steget fra 282 til 350 anløb fra 2015 til 2019 - svarende til en stigning på 24%.

Det samlede antal skibsanløb i Aarhus Havn er steget svagt med 9 % fra 2015-2019, men varierer en del fra år til år for de forskellige skibstyper. Antallet af anløb i Aarhus Havn er meget domineret af færger (Molslinjens passagerskibe), der udgør mellem 58 % og 66 % af alle anløb i perioden 2015-2019. Der er næst flest anløb af containerskibe, fulgt af bulkskibe og tankskibe. Anløb af ro-ro cargo skibe, øvrige skibe (f.eks. miljøskibe, inspektionsskibe, patruljefartøjer m.m.), general cargo skibe, slæbebåde og krydstogtskibe udgør kun

en lille del af det samlede antal anløb i perioden. Antal anløb af krydstogtskibe er steget kraftigt fra 11 til 32 anløb fra 2015 til 2019 svarende til en stigning på 290%.

For Aalborg, Skagen og Rønne Havn har der været en stor vækst i krydstogttrafikken fra 2015-2019. I denne periode er det samlede antal anløb med krydstogtskibe i Aalborg (fra 14 til 32), Skagen (fra 14 til 41) og Rønne Havn (fra 17 til 44), således steget med hhv. 129%, 193% og 159%.

Emissioner fra skibene i undersøgelsen

Den andel af emissionerne, som krydstogtskibe udgør af alle skibes emissioner, varierer meget fra havn til havn. Københavns Havn har langt den største del af emissionerne fra krydstogtskibe, mens det for de øvrige havne er relativt lavt. I 2019 beregnes CO_{2eq}*[NO_x,$PM_{2.5}$]* emissionsandele for krydstogtskibe på 57%*[50%, 71%]* for Københavns Havn, og 5%*[4%, 9%]* for Aarhus Havn. For de øvrige havne er kun opgjort emissionen fra krydstogtskibe.

I det følgende opsummeres udviklingen i emissionerne i havnene, og hvor meget de forskellige skibstyper bidrager med.

De største emissionskilder i Københavns Havn i alle år er krydstogtskibe, fulgt af tankskibes oliepumpning (losning af olieprodukter), passagerskibe, tankskibe, containerskibe og general cargo. Mindre emissionsbidrag beregnes for ro-ro cargo og slæbebåde samt uddybningsfartøjer, bulkskibe, forskningsskibe, offshorefartøjer og flydekraner. Udviklingen i CO_2-emissionerne følger udviklingen i energiforbruget. De totale CO_2-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 CO_{2eq}-emissioner med 7%. De samlede NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner stiger med hhv. 5% og 31% i samme periode.

De største emissionskilder i Aarhus Havn i alle år er containerskibe, fulgt af passagerskibe, bulkskibe, tankskibes oliepumpning (losning af olieprodukter) og general cargo. Mindre emissionsbidrag beregnes for tankskibe, krydstogtskibe, ro-ro cargo, øvrige skibe samt slæbebåde. De totale CO_{2eq}-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 CO_{2eq}-emissioner med 13 %. De samlede NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner stiger med hhv. 13 % og 21 % i samme periode.

Separat for krydstogtskibe i Københavns Havn stiger de totale CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2.5}$-emissioner med hhv. 34%, 26% og 62% fra 2015-2019. For Aarhus Havn har krydstogtskibenes emissioner varieret meget i den samme periode. De største CO_{2eq}- og NO_x-emissioner beregnes for 2018 og den største $PM_{2,5}$-emission beregnes for 2017. Fra 2015 til 2018 steg krydstogtskibenes CO_{2eq}- og NO_x-emissioner med hhv. 246% og 213%, og fra 2015-2017 steg $PM_{2,5}$-emissionerne med 763% i Aarhus Havn.

For krydstogtskibe i Aalborg Havn beregnes samlet set de største energiforbrug og emissioner i 2017. Lidt mindre energiforbrug og emissioner beregnes i 2018 og 2019, hvor de totale resultater er meget ens. De totale CO_{2eq}-emissioner stiger med 157% fra 2015-2017. Fra 2015-2019 er emissionsstigningen 127%. De samlede NO_x-og $PM_{2,5}$-emissioner stiger med hhv. 129% og 224% fra 2015-2017 og med hhv. 106% og 198% fra 2015-2019.

For krydstogtskibe i Skagen Havn og Rønne Havn beregnes samlet set de største energiforbrug og emissioner i 2019.

De totale CO_{2eq}-emissioner for krydstogtskibe stiger med 577% fra 2016-2019 i Skagen Havn. Fra 2015-2019 stiger CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissionerne med hhv. 245%, 479% og 457% for krydstogtskibe i Skagen Havn. I Rønne Havn stiger CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2.5}$-emissionerne for krydstogtskibe med hhv. 199%, 210% og 428% fra 2015-2019.

Generelt har der således været stigende emissioner fra 2016 til 2019 i de fem havne primært grundet flere anløb. Alt andet lige, vil skibenes påvirkning af luftkvaliteten også være størst i 2019 i forhold til øvrige år.

Sammenlignes den samtidige emission fra et gennemsnitligt krydstogtskib med emissionen fra en gennemsnitlig personbil i bytrafik i 2019 fås, at emissionen fra et krydstogtskib svarer til emissionen af omkring 3.900 personbiler for NO_x og omkring 5.500 personbiler for $PM_{2,5}$-udstødning regnet pr. tidsenhed (g/s). Tilsvarende for gennemsnittet af andre skibe er det omkring 600 personbiler for NO_x og omkring 400 personbiler for $PM_{2,5}$-udstødning regnet pr. tidsenhed (g/s).

Overskridelse af grænseværdien for luftkvalitet i højder af 25 m til 70 m

Det er en generel udvikling, at der ønskes fortsat udbygning med boliger i danske havne. For at belyse betydningen af krydstogtskibenes og andre skibes påvirkning af luftkvaliteten i højder over jordoverfladen (1,5 m), er der foretaget beregninger for forskellige højder (1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m). Eksempelvis er bygningerne på Langeliniekajen i Københavns Havn omkring 25 m høje, og der er andre bygninger i Købehavns Havn, som er væsentligt højere.

Krydstogtskibenes og andre skibes bidrag til luftforureningen stiger generelt med højden. Dette er forventeligt, da røgafkastet sker i relativ stor højde, og røgfanen oftere rammer et givent punkt i tilsvarende højde end ved jordoverfalden. Gennemsnithøjden af røgafkastet for krydstogtskibene er 45 m, hvor den for andre skibe er 22 m.

Krydstogtskibenes og andre skibes emission påvirker kun årsmiddelkoncentrationerne for NO_2 og $PM_{2,5}$ meget lidt ved jordoverfladen (1,5 m højde) i de tilstødende byområder beliggende op til havnene. Ved jordoverfladen er der ingen overskridelse af grænseværdierne for hverken årsmiddelværdien for $PM_{2,5}$ på 25 µg/m^3, årsmiddelværdien for NO_2 på 40 µg/m^3 eller den 19. største timeværdi for NO_2 på 200 µg/m^3.

Derimod er der overskridelser i højden.

Overskridelse af årsmiddelværdien af NO_2 i Aarhus Havn i 25 m højde

For årsmiddelværdien af NO_2 er der overskridelse af grænseværdien i 25 m i Aarhus Havn. Der er tale om en mindre overskridelse i to punkter helt tæt ved to kajpladser, idet årsmiddelværdien af NO_2 er på 41,8 µg/m^3, hvilket er en overskridelse af grænseværdien på 40 µg/m^3. Det er kun Aarhus Havn, som har overskridelse af årsmiddelværdien af NO_2.

Overskridelse af spidsværdi for NO_2 i flere havne og højder

For den 19. største timeværdi af NO_2 er der betydelige overskridelser af grænseværdien i Københavns Havn for højderne 25-70 m, i Aarhus Havn for højderne 50-70 m, i Aalborg Havn i 50 m og i Skagen Havn for højderne 50-70 m. I Aarhus Havn er grænseværdien således overskredet med en faktor 9. I Rønne er der ingen overskridelse. Selvom Aalborg Havn og Skagen Havn har omkring 10 gange færre anløb af krydstogtskibe i forhold til Københavns Havn kan overskridelse af den 19. største timeværdi af NO_2 altså godt forekomme, da der kun skal få timer til at få en overskridelse, hvis de meteorologiske forhold er ugunstige for spredningsforholdene. Sandsynligheden for overskridelser vil dog stige jo flere skibe, der er i en havn, og jo længere tid de ligger ved kaj.

Overskridelse af den 19. største timeværdi af NO_2 sker lokaliseret og i mindre områder omkring kajpladserne i havnene. I Københavns Havn sker overskridelserne i op til omkring 100-200 m fra kajpladserne, i Aarhus Havn op til omkring 100 m fra kajpladserne, i Aalborg Havn i den umiddelbare nærhed af kajpladserne, og i Skagen Havn op til omkring 150 m fra kajpladserne.

Der er ingen overskridelser af grænseværdien for årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$ i nogen højder i nogen af havnene.

I Københavns Havn bidrager især andre skibe til den maksimale NO_2-koncentration som årsmiddel ved jordoverfladen og i 25 m højde, mens krydstogtskibene især bidrager i 50 m og 70 m højde. I Aarhus Havn er det især andre skibe, som bidrager i alle højder til årsmiddelværdien af NO_2. Næsten sammen tendens ses for den 19. højeste timeværdi af NO_2.

Sammenligning med Det landsdækkende måleprogram

I forbindelse med Det nationale overvågningsprogram for luftkvalitet gennemføres der målinger af bl.a. årsmiddelværdien af NO_2 på landstationer, bybaggrundsstationer og gadestationer i Danmark. I 2018 og 2019 har der ikke været målt overskridelser af grænseværdien for NO_2, hverken som årsmiddelværdi eller spidsværdi (Ellermann et al., 2020a). Den beregnede overskridelse er således højere end selv den højeste målte værdi på en trafikeret gade som H.C. Andersens Boulevard i København.

Fremtidige forhold

I løbet af 2020 er Molslinjens færgeleje flyttet til den sydlige del af Aarhus Havn, og koncentrationsfordelingen vil derfor været anderledes, hvis koncentrationsberegninger blev gentaget for emissionernes placering i 2020.

Flere havne i Danmark arbejder med at etablere landstrøm, som vil fjerne lokale emissioner i forbindelse med, at skibenes ligger ved kaj. Det gælder bl.a. Københavns Havn.

Nordisk Ministerråd har i efteråret 2020 underskrevet en erklæring, der stadfæster, at Norden vil tage lederskab og arbejde for at mindske forureningen fra krydstogtskibe samt gøre Norden til en bæredygtig krydstogtdestination. De nordiske ministre anerkender behovet for både at reducere støjgener og luftforureningen der følger, når skibene lægger til kaj. Landstrøm peges på som en stor del af løsningen og ambitionen er at der skal etableres anlæg i alle store havne inden 2030 (https://www.norden.org/da/news/groen-luftfart-krydstogtturisme-og-plastikaffald-var-paa-dagsordenen-da-nordens-miljoe-og).

Flere rederier arbejder sammen med forskningsinstitutioner og industrien om udvikling og demonstration af bæredygtig CO2 neutrale brændstoffer som fx grøn ammoniak, som kan produceres ud fra luftens indhold af kvælstof og brint produceret ved elektrolyse med strøm fra vindmøller (Power-to-X).

1. Metode og datagrundlag

1.1 Kortlægning af skibe i danske havne

Der er udarbejdet en detaljeret statistik fordelt på skibstyper, for alle skibe der anløber Københavns Havn og Aarhus Havn fra 2015-2019, og en detaljeret statistik kun for krydstogtskibe, der anløber Aalborg, Skagen og Rønne Havn i samme periode. Oplysningerne er indhentet fra havnene. Oplysningerne omfatter: Skibets navn, IMO kode (International Maritime Organization), vægt i bruttoton (BT), anløbstidspunkt, afgangstidspunkt og kajnummer mv.

I forbindelse med luftkvalitetsberegningerne er det nødvendigt at kunne stedbestemme skibene. Derfor er der fremskaffet kort, som præcist viser, hvor de forskellige kajanlæg ligger i havnene. Luftkvalitetsberegninger er gennemført for krydstogtskibe for alle fem havne, og tillige for Københavns Havn og Aarhus Havn for både krydstogtskibe og øvrige skibe.

1.2 Emissionsfaktorer og fysiske parametre til luftkvalitetsberegninger

Luftkvalitetsberegningerne udføres med OML-modellen (Olesen et al., 2007) (OML-Multi version 6.2). OML-modellen kræver bl.a. inddata omkring emissionen og en række fysiske parametre for det enkelte skib.

For at kunne fastlægge brændstofforbrug og emissionsfaktorer for de enkelte skibe og dermed bestemme emissionen præcist, er det nødvendigt at kende en række parametre for det enkelte skib. Motorstørrelserne for skibenes hovedmotorer, motortype og motorbyggeår pr. skib er oplyst af Danske Rederier ud fra en global skibsdatabase. Hjælpemotorstørrelser estimeres pr. skibstype som funktion af skibenes bruttotons ud fra data i SHIP-DESMO - modellen. Oplysninger om skibet evt. er udstyret med scrubber (der reducerer svovl og partikler i skibets udstødning) kendes for krydstogtskibe fra tidligere undersøgelser. For øvrige skibe er der lavet en vurdering om evt. scrubberinstallation ud fra den tilgængelige viden i dette projekt.

NO_x-emissionsfaktoren (g/kWh) bestemmes ud fra en kurve over sammenhængen mellem motorbyggeår og emissionsfaktor. Emissionsfaktoren for partikler bestemmes ud fra brændstoftype og svovlindhold samt evt. brug af scrubber. Ligeledes er en række fysiske parametre som fx overbygningshøjde over vandlinje, skorstenshøjde over vandlinje, ydre og indre diameter af skorstensrør, volumenstrøm og røggastemperatur bestemt ud fra tidligere undersøgelser (Olesen & Berkowicz, 2005). HOK Marineconsult ApS har bidraget med data for skorstenshøjder på øvrige skibe.

Udover NO_x og partikler indeholder emissionsopgørelsen drivhusgasserne: CO_2 (kuldioxid), CH_4 (metan) og N_2O (lattergas) og den samlede drivhusgasemission opgjort som CO_2-ækvivalenter.

1.3 Krydstogtskibe og øvrige skibes påvirkning af luftkvaliteten i fem havne

Beregning af luftkvaliteten med OML-modellen i nærområderne

OML-modellen anvendes til at belyse, hvordan luftkvaliteten påvirkes i de fem havne. Fokus er på nærområderne i havnene, da den tidligere rapport

(Jensen et al., 2019) viste, at det var i disse områder, der kunne være overskridelser af grænseværdien, og bidragene fra havnene til nærliggende byområder var meget begrænset. I København og Aarhus er nærliggende byområder dog inddraget, da undersøgelsen ud over krydstogtskibe også omfatter øvrige skibe, som potentielt kunne påvirke nærliggende byområder.

Luftkvalitetsberegninger gennemføres med samme metode som i den tidligere rapport (Jensen et al., 2019), dvs. samme stoffer og samme beregningshøjder. Beregninger er gennemført for årsmiddelværdien af NO_2 (kvælstofdioxid) og $PM_{2,5}$ (massen af partikler under 2,5 mikrometer) samt for spidsværdier repræsenteret ved den 19. højeste timeværdi for NO_2. Skibes emission af PM_{10} er næsten identisk med $PM_{2,5}$, så luftkvalitetsberegninger, som tager udgangspunkt i $PM_{2,5}$-emissionen, vil give næsten samme resultater som for PM_{10}. PM_{10} er massen af partikler under 10 mikrometer. Da grænseværdien for $PM_{2,5}$ er betydelig lavere end for PM_{10}, fokuseres kun på $PM_{2,5}$.

Luftkvalitetsberegninger for alle skibe i København og Aarhus

Luftkvalitetsberegningerne gennemføres for de 2 største havne (Københavns Havn og Aarhus Havn) for alle skibe og for hver af grupperne krydstogtsskibe og øvrige skibe, således at det er muligt at sammenligne bidragene til luftkvaliteten fra disse to grupper. I forhold til tidligere er det nyt, at bidragene fra øvrige skibe også belyses. Øvrige skibe omfatter: Pramme, bulkskibe, containerskibe, kraner, bundsugningsfartøjer, general cargo, offshore, passagerskibe, forskningsskibe, ro-ro cargo, tankskibe, slæbebåde og tankskibe pumpning. Se kort beskrivelse af de forskellige skibstyper i Tabel 1.1.

Tabel 1.1. Kort beskrivelse af andre skibe end krydstogtskibe

Type	Beskrivelse
Pram	Skib kendetegnet ved flad bund og uden egen maskine.
Bulkskib	Fragtskib der transporterer løst gods som f.eks. korn og grus.
Containerskib	Skib som udelukkende transporterer gods pakket i standardiserede containere.
Flydekraner	Skib eller pram med kran på.
Uddybningsfartøjer	Skib som fjerner materiale fra havbunden og flytter det andre steder hen. Bruges til uddybning af f.eks. havneindløb.
General cargo	Skib til transport af gods, som skal håndteres individuelt, og som ikke nødvendigvis er i containere, men som ofte transporteres i sække , bokse, på paller mv.
Offshore	Offshore skibe er specielt designet til at understøtte fx bygning af konstruktioner til søs som havvindmøller eller støtte/forsyningsskibe til boreplatforme.
Passagerskibe	Skib indrettet til transport af mennesker.
Forskningsskibe	Skib specielt designet til at udføre forskningsformål til søs.
Ro-ro cargo	Skib (Ro-ro: Roll-on/roll-off) indrettet til transport af gods pakket på køretøjer, der kører ombord/fra borde.
Tankskib	Skib indrettet til transport af fyldende gods f.eks. olie.
Slæbebåde	Båd indrettet til at slæbe og skubbe andre skibe.

Luftkvalitetsberegninger kun for krydstogtskibe i Aalborg, Skagen og Rønne

Endvidere gennemføres også luftkvalitetsberegninger for de 3., 4. og 5. største havne (Skagen, Aalborg, Rønne), men kun for krydstogtskibene. Grunden til denne afgrænsning er, at det er ressourcekrævende at gennemføre luftkvalitetsberegninger, da det kræver omfattende indhentning og bearbejdning af inputdata om emission mv. Da den tidligere undersøgelser kun omhandlede

Københavns Havn og Aarhus Havn vil luftkvalitetsberegninger for krydstogtskibe for yderligere 3 havne give værdifuld viden til de berørte havne og kommuner, og være mere nationalt dækkende.

Luftkvalitetsberegninger i forskellige højder

For nærområderne beregnes iso-konturlinjer for at illustrere den geografiske deling af koncentrationsbidragene fra krydstogtskibene og øvrige skibe. Dette visualiseres på digitale luftfotos. Årsmiddelværdier for NO_2 beregnes samt bidrag til $PM_{2,5}$. Endvidere vises den 19. højeste koncentration af NO_2, da der er en grænseværdi for denne indikator. Denne indikatorer illustrerer, hvordan spidsværdier påvirkes af krydstogtskibenes emissioner.

Beregningerne gennemføres for forskellige højder, som er valgt med udgangspunkt i eksisterende bygningshøjder i nærområderne samt muligt højere fremtidigt byggeri i havneområderne. Beregninger af vertikale profiler, hvor koncentrationsniveauerne beregnes i mange forskellige højder viser, at de højeste koncentrationer optræder mellem 50 m og 70 m. Beregningshøjderne er valgt til at være 1,5 m (jordniveau), 25 m, 50 m og 70 m. 25 m svarer ca. til højden af bygningerne langs Langeliniekajen i København. Da krydstogtskibene er høje, og røgafkastet derfor foregår i en stor højde, vil koncentrationsbidraget være meget højere i større højder end ved jordoverfladen. Derfor vil det potentielt være højt i de tilfælde, hvor krydstogtskibet ligger op ad bygninger med sammenlignelige højder som krydstogtskibets skorsten.

Alle højder for beregningspunkterne er kotehøjde, dvs. i forhold til normal vandstand. I havnen vil der være nogle få meters afstand fra terræn til vandlinje, og denne afstand vil variere med vandstanden.

OML-modellen kræver baggrundskoncentrationer til brug for NO_2-beregninger. Bybaggrundskoncentrationer er anvendt fra målestationer i hhv. København, Aarhus og Aalborg under det nationale overvågning af luftkvaliteten i Danmark (Ellermann et al., 2020a). I forhold til NO_x-beregningerne består de målte baggrundsdata til OML af NO_x-, NO_2- og O_3-koncentrationer samt globalstråling for hver time i beregningsperioden. Det er nødvendigt med disse målinger for at kunne beregne de kemiske reaktioner, som blandt andet styres af globalstråling, og temperaturen indgår også. I de perioder, hvor der mangler målinger, anvendes beregnede koncentrationer fra modellerne DEHM (the Danish Eulerian Hemispheric Model; Christensen, 1997; Brandt et al., 2012) og UBM (the Urban Background Model; Berkowicz, 2000b). For Skagen og Rønne er der ikke målinger til rådighed, hvor der udelukkende er brugt modellerede baggrundsdata.

For partiklerne laves beregninger for den direkte emitterede del af $PM_{2,5}$ fra skibe, som ikke påvirkes af kemisk omdannelse og dermed af andre stoffer i atmosfæren. NO_x-emissionen fra skibe bidrager også til dannelsen af $PM_{2,5}$ i atmosfæren, men pga. reaktionshastigheden bidrager det ikke til de lokale niveauer, men kun til $PM_{2,5}$-niveauet på regional skala.

OML-modellen kræver også input af meteorologiske data. Der er anvendt meteorologisk data baseret på data fra vejrmodellen WRF (Weather Research and Forecast Modeling System), (Skamarock et al., 2008), som også benyttes til luftkvalitetsberegninger i det nationale overvågning af luftkvaliteten i Danmark. Da forskelle i meteorologi fra år til år har betydning for koncentrationsniveauerne, er det belyst, hvor forskellige de relevante meteorologiske parmetre er i perioden 2015-2019. På baggrund af analyser af vindretning er 2019

valgt som meteorologisk år, da det bedst ligner gennemsnittet for en lang årrække, og samtidig er det seneste år med emissionsdata. 2019 kan derfor anses som et meteorologisk repræsentativt år.

Overfladens ruhed har betydning for turbulens og spredning. Der er anvendt en ruhedsparameter på 0,5 m svarende til den relativ høje bebyggelse.

I luftkvalitetsberegninger af NO_2 er det antaget, at 15% af NO_x ($NO+NO_2$)-emissionen er direkte emission af NO_2. I rapporten af Olesen & Berkowicz (2005) blev der gennemført OML-beregninger af følsomheden over for parametervariationer. Således ændredes maksimalværdien af den 19. største timemiddel for NO_2 sig kun fra 103 µg/m^3 til 105 µg/m^3 ved en ændring af den direkte NO_2-emission fra 10% til 15%. Den øgede koncentration optrådte i umiddelbar nærhed af udslippet. NO_2-koncentrationen i større afstande er meget mindre følsom over for den direkte emissionsprocent af NO_2, da koncentrationen her er styret af NO_x-emissionen og baggrundsforureningens indhold af O_3. Følsomheden over for røggastemperaturen var også minimal.

Betydning af bygninger for spredningsforholdene

Større bygninger tæt på skibene kan især for mindre skibe have indflydelse på spredningsforholdene. Disse bygninger er inddraget i beregningerne for et skib, når nærliggende bygninger er højere end skibsskroget, idet OML-modellen kan tage hensyn til spredningseffekterne. For de forskellige kajpladser er det vurderet, om der er større bygninger tæt på kajpladserne ud fra GIS-kort med bygningshøjder samt fotos via Google Maps. I den tidligere undersøgelse (Jensen et al., 2019), som kun omfattende krydstogtskibe, blev bygningseffekter ikke inkluderet, da bygningerne nær kajpladserne ikke vurderes at have væsentlig indflydelse på spredningsberegningerne for store krydstogtskibe, idet bygningerne var mindre end skibsskrogene.

Sammenligning med grænseværdier

De modellerede koncentrationer af årsmiddelværdien for NO_2 og den 19. højeste timeværdi for NO_2 samt bidraget til årsmiddelværdien for $PM_{2,5}$ er sammenlignet med grænseværdierne. Grænseværdien for årsmiddelværdien for NO_2 er 40 µg/m^3 og for den 19. højeste timeværdi for NO_2 er den 200 µg/m^3. Den 19. højeste timeværdi repræsenterer de højeste koncentrationer og dermed spidsværdier af NO_2. Grænseværdien for årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$ er 25 µg/m^3.

Grænseværdierne er beskrevet i luftkvalitetsdirektivet (EU, 2008) og tilhørende danske bekendtgørelser. Grænseværdierne er opstillet for at beskytte folkesundheden ved at "undgå, forhindre eller begrænse skadelige virkninger på menneskers sundhed og på miljøet som helhed". Grænseværdierne gælder for udeluft. Der er også undtagelser, hvor grænseværdierne ikke skal vurderes fx på kørebaner; lokaliteter, hvor offentligheden ikke har adgang, og der ikke er permanent bebyggelse; samt fx industriområder, hvor anden lovgivning finder anvendelse. Luftkvalitetsdirektivet nævner ikke specifikt, hvorvidt grænseværdierne gælder i højden. Givet intentionen i luftkvalitetsdirektivet er det vores vurdering, at grænseværdierne vil gælde for udeluften, hvor mennesker opholder sig i havneområder, herunder fx boliger i etagebyggeri i havneområder.

2. Anløb af skibe

Dette kapitel giver en detaljeret statistik fordelt på skibstyper, for alle krydstogtskibe og øvrige skibe, der anløber Københavns Havn og Aarhus Havn fra 2015-2019, og en detaljeret statistik for alle krydstogtskibe, der anløber Aalborg, Skagen og Rønne Havn i samme periode. De samlede lister med anløbsdata er vist i Bilag 1. I forbindelse med luftkvalitetsberegninger anvendes de detaljerede oplysninger om det enkelte skib. I dette kapitel vises totale anløbstal fordelt pr. år og skibstyper.

2.1 Anløb af skibe i Københavns Havn

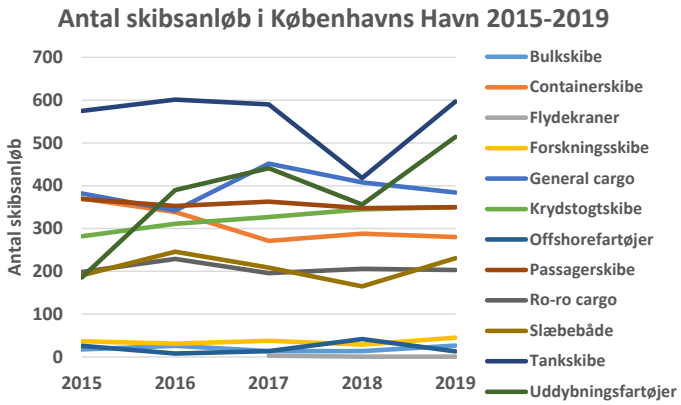
Som input til emissionskortlægningen bruges anløbsdata for de enkelte skibe i Københavns Havn for perioden 2015-2019, der indeholder oplysninger om bl.a. skibets navn, skibstype, IMO kode, bruttoton (BT) og ankomst- og afsejlingstidspunkt, havneområde og kajnummer (Hansen, 2020a; Nørgaard, 2020). Antal skibsanløb pr. skibstype i Københavns Havn 2015-2019 er vist i Tabel 2.1 og Figur 2.1.

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 2.1 for 2015-2019.

Tabel 2.1. 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
Forskningsskibe	37	31	38	29	45
General cargo	382	342	452	408	384
Krydstogtskibe	282	311	327	345	350
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	2638	2876	2918	2620	2995
Tankskibe – losning (1000 tons olie)	2628	2974	2136	1828	2195

Det samlede antal skibsanløb er steget med 14 % fra 2015-2019, men varierer en del fra år til år for de forskellige skibstyper (Tabel 2.1 og Figur 2.1). I alle år er der flest anløb af tankskibe og kun få anløb af forskningsskibe, bulkskibe, offshorefartøjer og flydekraner. I 2019 er der næstflest anløb af uddybningsfartøjer, fulgt af general cargo, passagerskibe, krydstogtskibe, containerskibe, slæbebåde og ro-ro cargo. I 2019 udgør krydstogtskibe omkring 12% af alle anløb, mens øvrige skibe udgør 88%.



Figur 2.1. Antal anløb pr. skibstype i Københavns Havn 2015-2019.

Figur 2.2 viser antallet af anløb af skibe i Københavns Havn i 2019 fordelt pr. måned for alle skibe og for de vigtigste skibstyper; tankskibe, general cargo, passagerskibe, krydstogtskibe, containerskibe, slæbebåde, general cargo og uddybningsfartøjer. Tilsvarende figurer for forskningsskibe, bulkskibe, offshorefartøjer og flydekraner er vist i Bilag 2. Krydstogtskibe har en karakteristisk sæsonvariation med langt de fleste anløb i sommerhalvåret. Andre skibe har en mere jævn fordeling over året, hvor uddybningsfartøjer dog kan variere voldsomt.

Figur 2.2. Antallet af anløb af skibe (i alt og vigtigste skibstyper) i Københavns Havn i 2019 fordelt pr. skibstype og måned.

2.2 Anløb af skibe i Aarhus Havn

Som input til emissionskortlægningen bruges anløbsdata for de enkelte skibe i Aarhus Havn for perioden 2015-2019, der indeholder oplysninger om bl.a. skibets navn, skibstype, IMO kode, bruttoton (BT) og ankomst- og afsejlingstidspunkt og kajnummer (Rytter, 2020; Sønnichsen, 2020)[1]. Den samlede liste med anløbsdata er vist i Bilag 1.

Antal skibsanløb pr. skibstype i Aarhus Havn 2015-2019 er vist i Tabel 2.2 og Figur 2.3. For passagerskibe viser Figur 2.3 anløbstallene divideret med 10, da antallet af passagerskibe er meget større end de andre skibstyper, som ville forsvinde i figuren, hvis anløbstallene ikke blev divideret med 10.

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 Aarhus Havn hentes fra Danmarks Statistik (2020). De lossede mængder af olie for tankskibene (1000 tons) er også vist i Tabel 2.2 for 2015-2019.

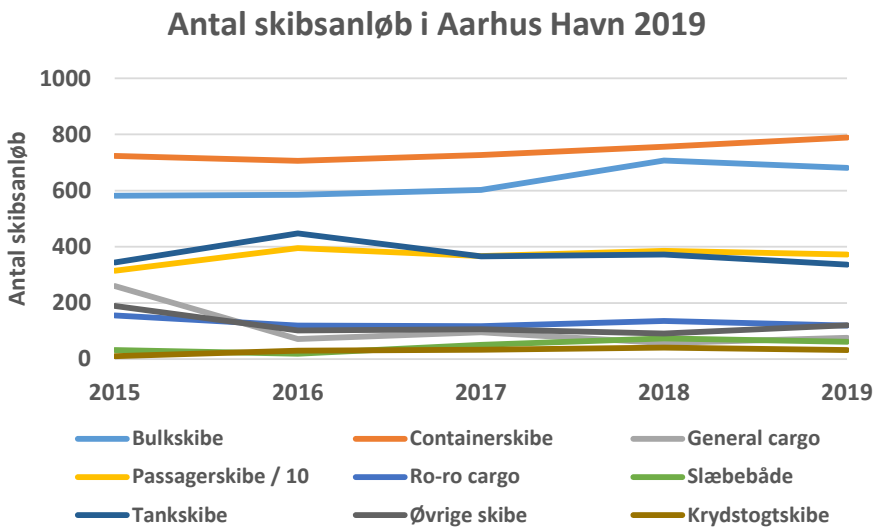
Tabel 2.2. Antal anløb pr. skibstype og lossede oliemængder (1000 tons) i Aarhus Havn 2015-2019.

Skibstype	2015	2016	2017	2018	2019
Bulkskibe	582	585	603	707	681
Containerskibe	724	706	727	756	789
General cargo	260	72	96	58	76
Krydstogtskibe	11	30	34	41	32
Passagerskibe	3152	3953	3670	3852	3728
Ro-ro cargo	156	120	118	136	120
Slæbebåde	32	19	51	74	62
Tankskibe	344	448	366	373	337
Øvrige skibe	190	102	107	91	121
I alt anløb	5451	6035	5772	6088	5946
Tankskibe – losning (1000 tons olie)	1110	1325	1215	1223	1145

Det samlede antal skibsanløb er steget svagt med 9 % fra 2015-2019, men varierer en del fra år til år for de forskellige skibstyper (Tabel 2.2 og Figur 2.3). Antallet af anløb i Aarhus Havn er meget domineret af færger (passagerskibe), der udgør mellem 58 % og 66 % af alle anløb i perioden 2015-2019. Der er næstflest anløb af containerskibe, fulgt af bulkskibe og tankskibe. Anløb af ro-ro cargo skibe, øvrige skibe[2], general cargo skibe, slæbebåde og krydstogtskibe udgør kun en lille del af det samlede antal anløb i perioden. Anløb af krydstogtskibe udgør under 1% af alle anløb i 2019.

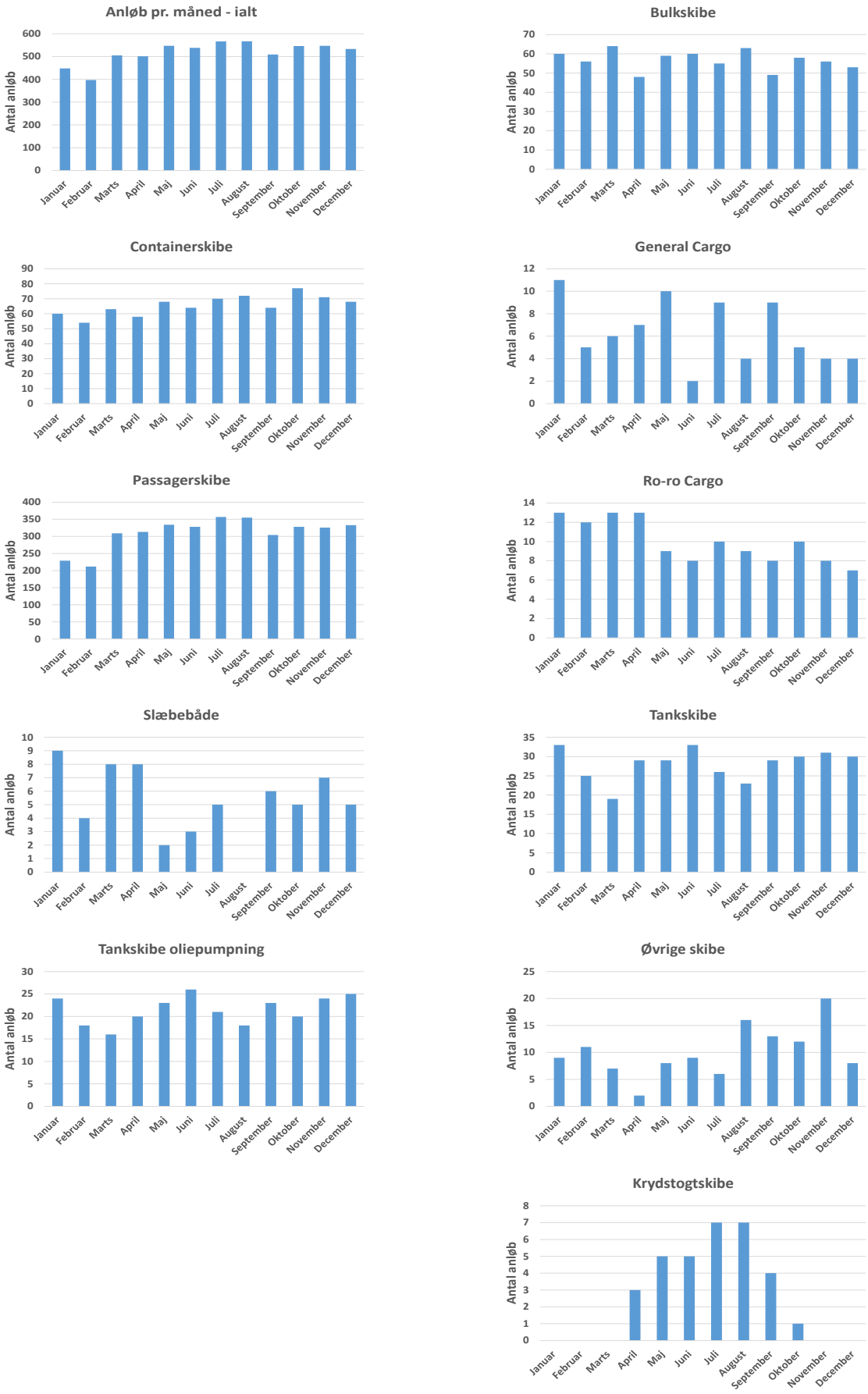
[1] For passagerskibe indeholdt havnedata kun samlede antal anløb pr. færge pr. måned i det enkelte år. De samlede anløb er efterfølgende tidsligt fordelt ud på de enkelte kajpladser med bistand fra Molslinjen mht. anløbstidspunkter og kajtider for færgernes hverdags- og weekendtrafik.

[2] Øvrige skibe består af miljøskibe, inspektionsskibe, patruljefartøjer m.m. der behandles som forskningsskibe i de videre emissionsberegninger.



Figur 2.3. Antal anløb pr. skibstype i Aarhus Havn 2015-2019. For passagerskibe er anløbstallene divideret med 10.

Figur 2.4 viser antallet af anløb af skibe i Aarhus Havn i 2019 fordelt pr. skibstype og måned.



Figur 2.4. Antallet af anløb af skibe i Aarhus Havn i 2019 fordelt pr. skibstype og måned.

2.3 Anløb af krydstogtskibe i Aalborg, Skagen og Rønne Havn

Som input til emissionskortlægningen bruges anløbsdata for de enkelte krydstogtskibe i Aalborg Havn (Lind, 2020), Skagen Havn (Jensen, 2020) og Rønne Havn (Lindberg, 2020) for perioden 2015-2019, der indeholder oplysninger om bl.a. skibets navn, skibstype, IMO kode, bruttoton (BT) og ankomst- og afsejlingstidspunkt og kajnummer. Den samlede liste med anløbsdata er vist i Bilag 1.

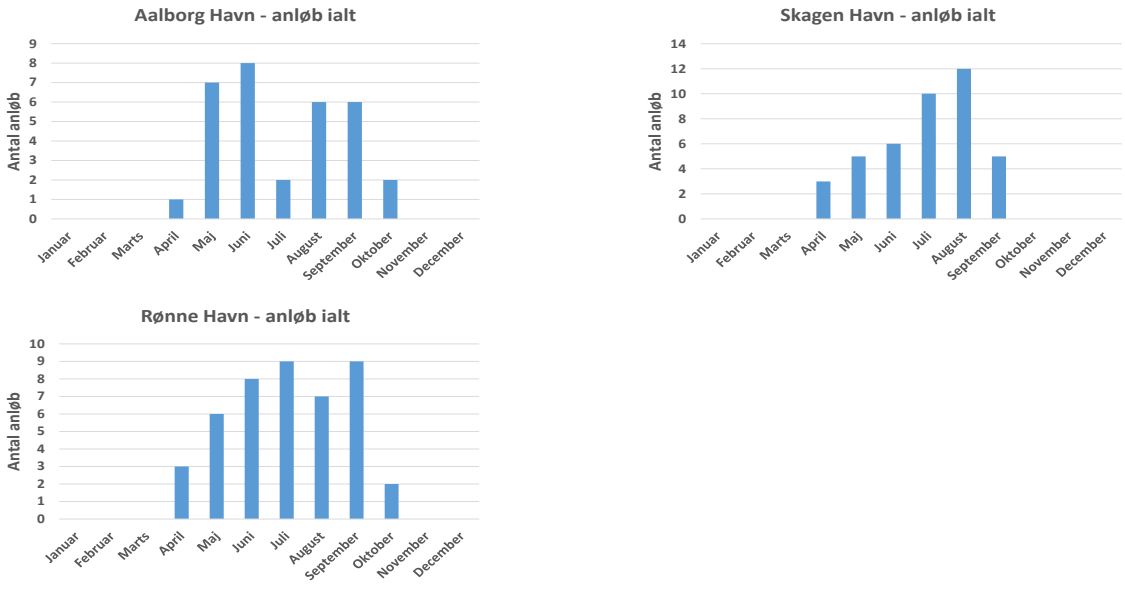
Antal anløb med krydstogtskibe i Aalborg Havn, Skagen Havn og Rønne Havn 2015-2019 er vist i Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Antal anløb af krydstogtskibe i Aalborg, Skagen og Rønne Havn 2015-2019.

Havn	Skibstype	2015	2016	2017	2018	2019
Aalborg	Krydstogtskibe	14	21	35	33	32
Skagen	Krydstogtskibe	14	13	28	43	41
Rønne	Krydstogtskibe	17	20	24	40	44

Der har været en stor vækst i krydstogttrafikken på de tre havne i perioden fra 2015-2019. Det samlede antal anløb med krydstogtskibe er steget med hhv. 129%, 193% og 159% fra 2015-2019 i Aalborg, Skagen og Rønne Havn. Skagen og Rønne Havne har lidt flere krydstogtskibe end Aalborg.

Figur 2.5 viser antallet af anløb af krydstogtskibe i Aalborg, Skagen og Rønne Havn i 2019 fordelt pr. måned.



Figur 2.5. Antallet af anløb af krydstogtskibe i Aalborg, Skagen og Rønne Havn i 2019 fordelt pr. måned.

3. Placering af krydstogtskibe og andre skibe i beregningsområder

Krydstogtskibene og andre skibe anløber bestemte kajpladser. Ud fra kort over kajpladser i de fem havne erhvervet fra havnene, er kajpladserne digitaliseret ved at finde den tilsvarende koordinat i Krak.dk, således at kajpladserne kan vises på et digitalt luftfoto i GIS. Ud over en kajplads for anløb af et krydstogtskib angives også i nogle tilfælde et pælenummer, men disse er ikke vist på kortene fra havnene, så disse oplysninger har ikke kunnet anvendes. Dette bidrager til en lille usikkerhed om, hvor skibet præcist har ligget i disse tilfælde. Kajpladserne har været anvendt i perioden 2015-2019, men ikke nødvendigvis samtlige kajpladser et givet år.

For Københavns Havn og Aarhus Havn er der vist kajpladser for både krydstogtskibe og andre skibe, mens det for havnene i Aalborg, Skagen og Rønne kun er krydstogtskibe.

3.1 Placering af kajpladser i de fem havne

Københavns Havn

Placering af kajpladser for anløb af krydstogtskibe (grønne prikker) og andre skibe (røde prikker) i Københavns Havn er vist i Figur 3.1. Som det fremgår, kan nogle kajpladser for anløb af krydstogtskibe også benyttes til anløb af andre skibe.

I Københavns Havn er der 18 kajpladser til krydstogtskibe. Kajplads 177 hedder Nordre Toldbod, kajplads 190 til 198 hedder Langeliniekajen, 254 Orientkajen, kajplads 266 Levantkajen, og kajplads 330 til 333 Oceankajen.

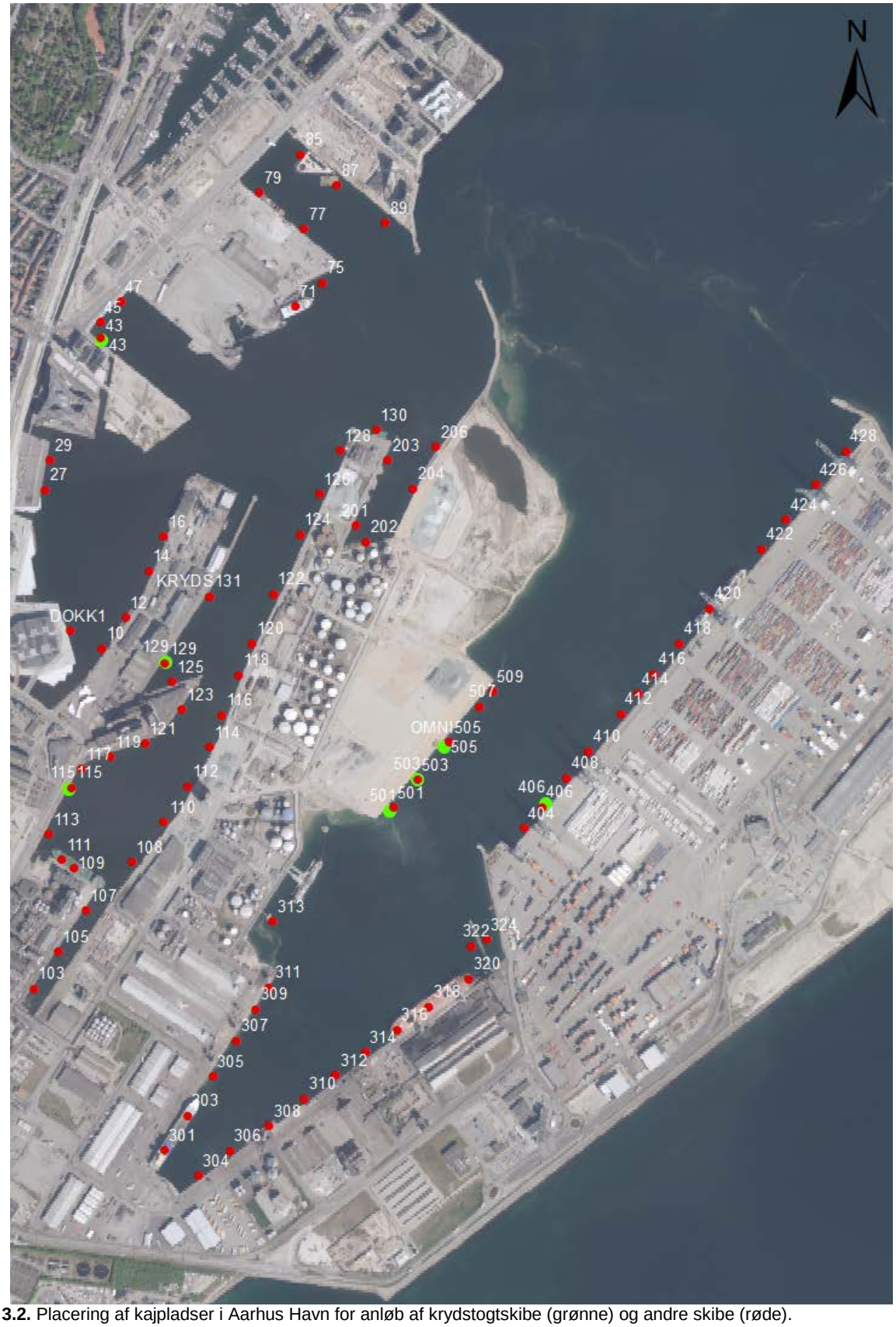
Der er 106 kajpladser til andre skibe.

Figur 3.1. Placering af kajpladser i Københavns Havn for anløb af krydstogtskibe (grønne) og andre skibe (røde).

Aarhus Havn

Placering af kajpladser for anløb af krydstogtskibe (grønne prikker) og andre skibe (røde prikker) i Aarhus Havn er vist i Figur 3.2.

Der er syv kajpladser til krydstogtskibe i Aarhus Havn, og 86 kajpladser til andre skibe.



Figur 3.2. Placering af kajpladser i Aarhus Havn for anløb af krydstogtskibe (grønne) og andre skibe (røde).

Aalborg Havn

Placering af kajpladser for anløb af krydstogtskibe (grønne prikker) i Aalborg Havn er vist i Figur 3.3.

I Aalborg Havn er der tre kajpladser, som kan benyttes af krydstogtskibe.

Figur 3.3. Placering af kajpladser i Aalborg Havn for anløb af krydstogtskibe (grønne).

Skagen Havn

Placering af kajpladser for anløb af krydstogtskibe (grønne prikker) i Skagen Havn er vist i Figur 3.4.

I Skagen Havn er der to kajpladser, som kan benyttes af krydstogtskibe.

Figur 3.4. Placering af kajpladser i Skagen Havn for anløb af krydstogtskibe (grønne).

Rønne Havn

Placering af kajpladser for anløb af krydstogtskibe (grønne prikker) i Rønne Havn er vist i Figur 3.5.

I Rønne Havn er der tre kajpladser, som kan benyttes af krydstogtskibe. Kajplads 34 er en nyere kajplads etableret ved opfyldning af dele af havnebassinet, og som kan tage store krydstogtskibe. Den er taget i brug i sommeren 2019.

Figur 3.5. Placering af kajpladser i Rønne Havn for anløb af krydstogtskibe (grønne).

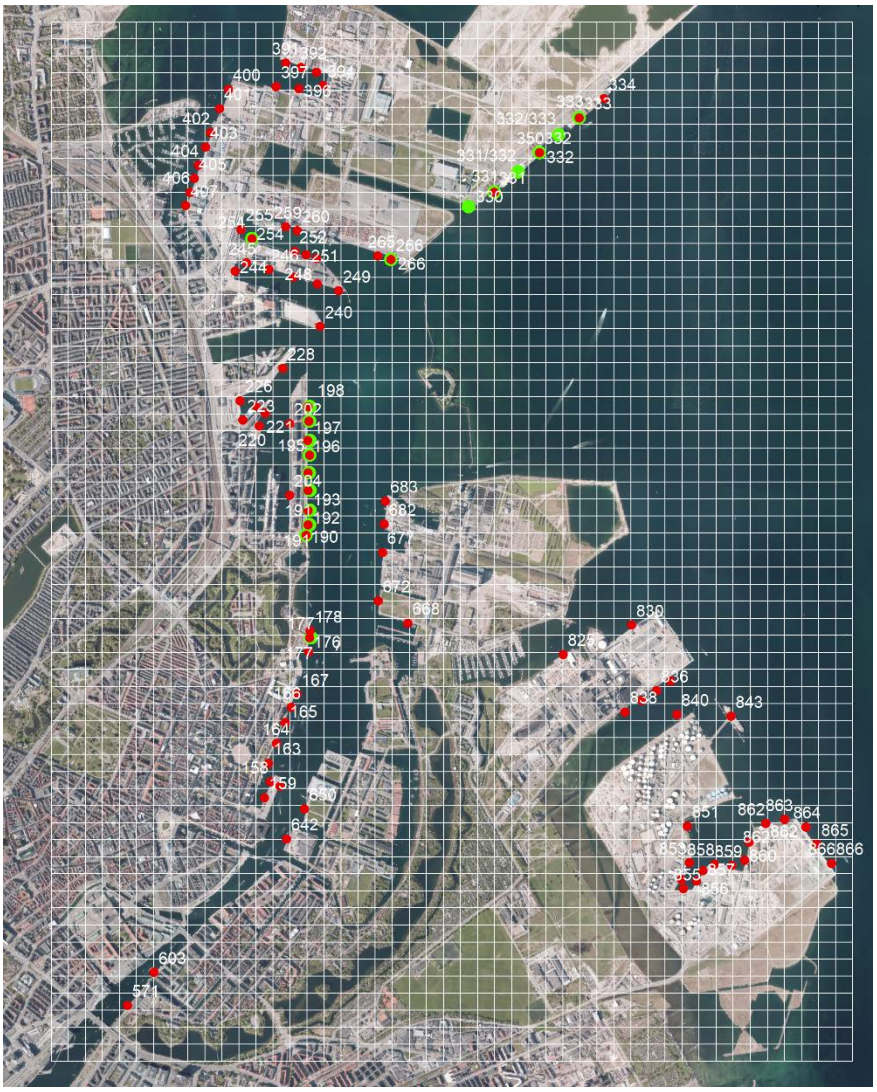
3.2 Beregningsområder i de fem havne

Den tidligere undersøgelse af krydstogtskibes påvirkning af luftkvaliteten i Københavns Havn og Aarhus Havn i 2017 viste, at det var nærområderne i havnene, der var påvirket af skibenes emissioner, og at krydstogtskibenes bidrag til byområder længere væk var forsvindende lille. Valg af beregningsområder har derfor fokus på nærområderne i havnene, men også nærtliggende byområder er inkluderet.

For hver havn er der defineret et beregningsområde, som er et firkantet område bestående af kvadratiske gitterceller. Beregningspunktet er centerpunktet i en gittercelle.

Beregningsområde for Københavns Havn

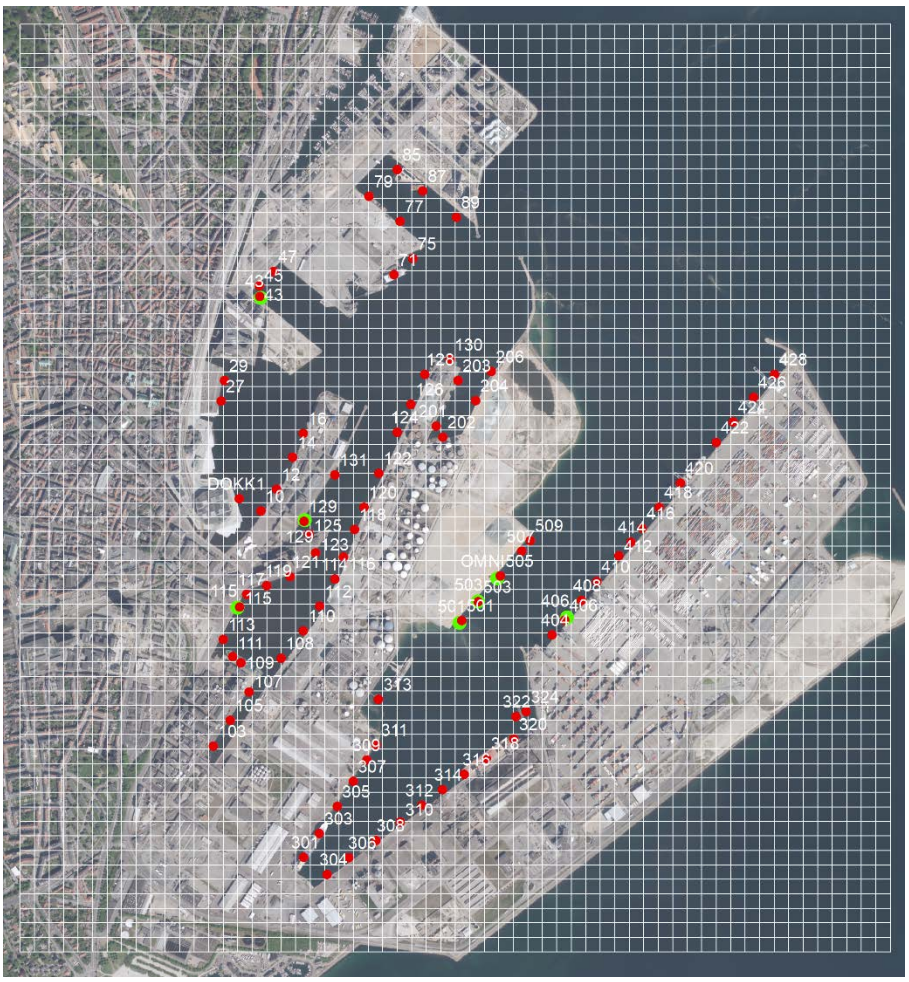
Beregningsgitternettet er vist i Figur 3.6 for Københavns Havn. Gitternettet er 4.700 m x 6.100 m med en gittercellestørrelse på 100 m x 100 m. Beregningspunktet er i midten af cellerne, og der er i alt 2.867 beregnings-punkter.



Figur 3.6. Gitternet for nærområde i Københavns Havn.

Beregningsområde for Aarhus Havn

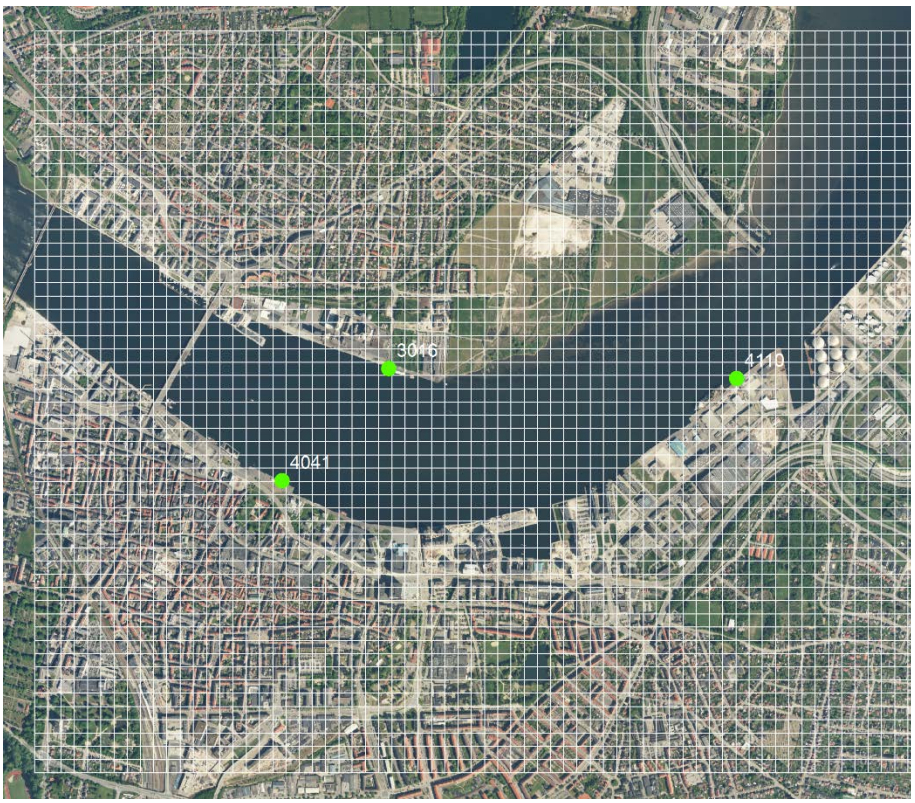
Beregningsgitternettet er vist i Figur 3.7 for Aarhus Havn. Gitternettet er 3.000 m x 3.200 m med en gittercellestørrelse på 50 m x 50 m. Beregningspunktet er i midten af cellerne, og der er i alt 3.840 beregningspunkter.



Figur 3.7. Gitternet for nærområde i Aarhus Havn.

Beregningsområde for Aalborg Havn

Beregningsgitternettet er vist i Figur 3.8 for Aalborg Havn. Gitternettet er 3.400 m x 2.800 m med en gittercellestørrelse på 50 m x 50 m. Beregningspunktet er i midten af cellerne, og der er i alt 3.808 beregningspunkter.



Figur 3.8. Gitternet for nærområde i Aalborg Havn.

Beregningsområde for Skagen Havn

Beregningsgitternettet er vist i Figur 3.9 for Skagen Havn. Gitternettet er 2.000 m x 1.300 m med en gittercellestørrelse på 50 m x 50 m. Beregningspunktet er i midten af cellerne, og der er i alt 1.040 beregningspunkter.

Figur 3.9. Gitternet for nærområde i Skagen Havn.

Beregningsområde for Rønne Havn

Beregningsgitternettet er vist i Figur 3.10 for Rønne Havn. Gitternettet er 2.000 m x 2.000 m med en gittercellestørrelse på 50 m x 50 m. Beregningspunktet er i midten af cellerne, og der er i alt 1.600 beregningspunkter.

Figur 3.10. Gitternet for nærområde i Rønne Havn.

4. Emissioner fra skibe

Dette kapitel beskriver emissionen fra skibene og en række fysiske parametre, som er nødvendige for beregning af luftkvaliteten med OML-modellen.

I forbindelse med luftkvalitetsberegninger med OML-modellen er det nødvendigt at bestemme emissionsraten, som opgøres i gram pr. sekund for det enkelte skib for dets anløbsperiode. I det følgende er forudsætningerne beskrevet for bestemmelse af emissionsraterne for NO_x og $PM_{2,5}$. Først bestemmes energiforbruget ved kaj og manøvrering, og ud fra specifikke emissionsfaktorer (emission pr. energienhed) bestemmes den samlede emission, hvorefter emissionsraten (emission pr. tidsenhed) kan bestemmes til brug for luftkvalitetsberegningerne.

I forbindelse med de efterfølgende luftkvalitetsberegninger med OML-modellen anvendes emissionsraten for det enkelte skib, dets konkrete placering i havnen og dets fysiske parametre som fx skorstenshøjde samt skibets anløbsperiode.

4.1 Hoved- og hjælpemotorstørrelser, motorbelastningsfaktorer og tidsrum for manøvrering og kajophold

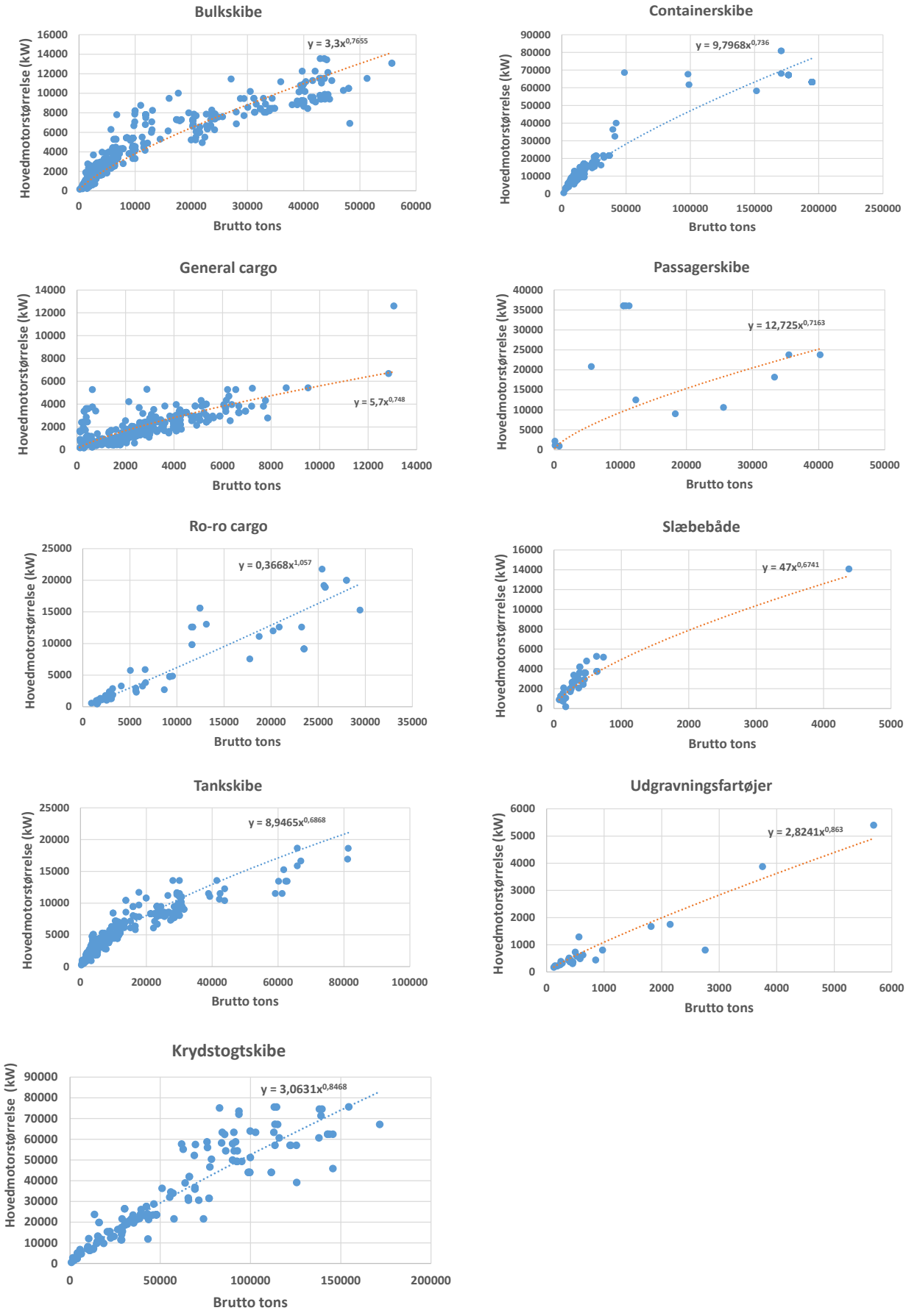
Motorstørrelserne for skibenes hovedmotorer (kW), motortype (2-takt/4-takt), og motorbyggeår pr. skib er oplyst af Danske Rederier (P.W. Kristensen, 2020) ud fra en global skibsdatabase. Hjælpemotorstørrelser estimeres pr. skibstype som funktion af skibenes bruttotons ud fra data i SHIP-DESMO -modellen (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 de enkelte havne (f.eks. Nørgaard, 2020; Lindberg, 2020).

Hovedmotorstørrelse som funktion af bruttotons er vist i Figur 4.1 for de forskellige skibstyper i undersøgelsen. Punkterne på figurerne repræsenterer de faktiske skibe i undersøgelsens anløbsdata, hvor hovedmotorstørrelsen er fundet ud fra Danske Rederiers globale skibsdata[3]. Regressionsligningerne vist på kurverne bruges til at beregne hovedmotorstørrelsen i de få tilfælde, hvor hovedmotorstørrelsen ikke er kendt. Tilsvarende figurer for forskningsskibe og offshorefartøjer er vist i Bilag 3.

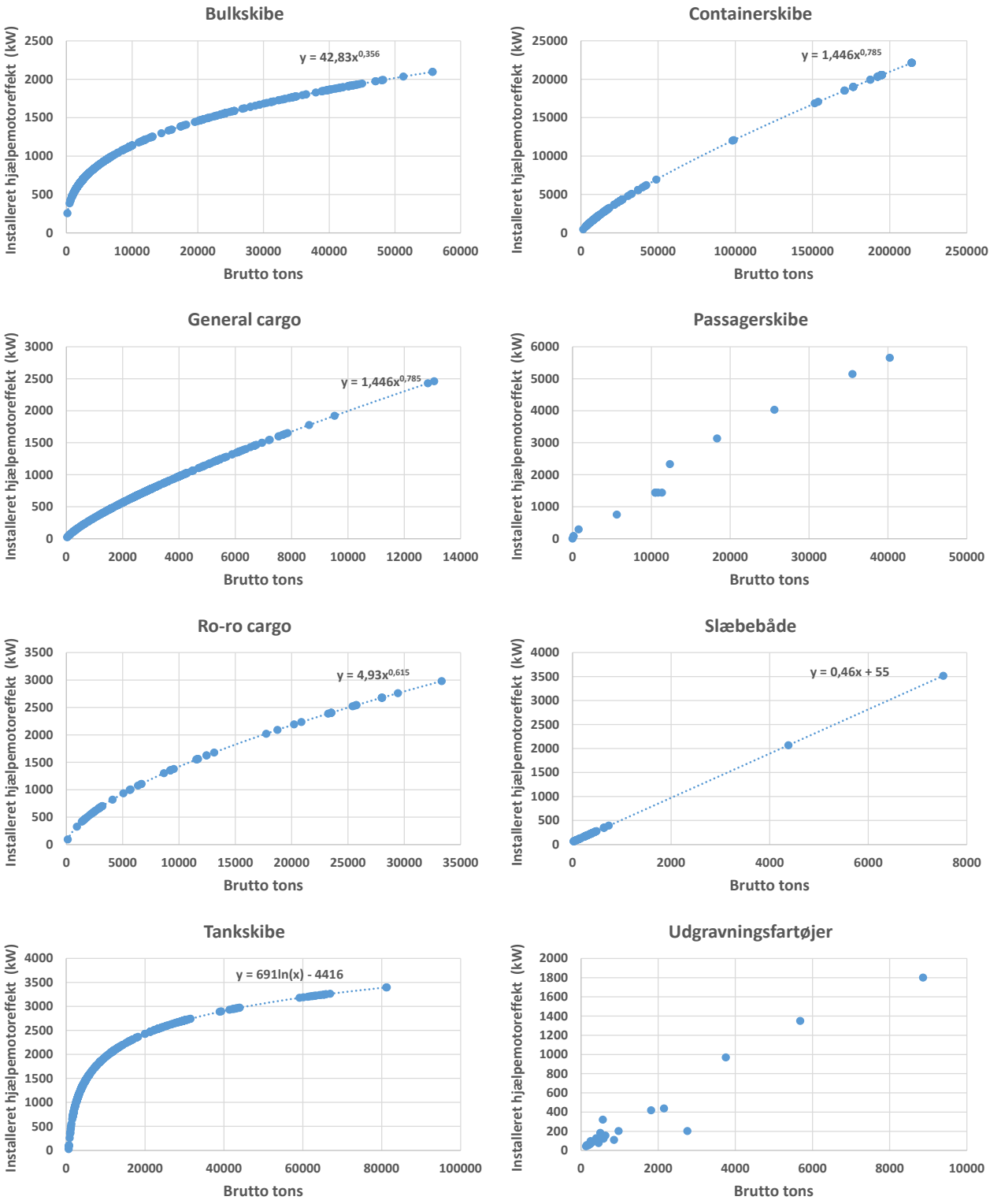
Beregnet installeret hjælpemotoreffekt som funktion af bruttotons er vist i Figur 4.2 for de forskellige skibstyper i undersøgelsen. Punkterne på figurerne repræsenterer de installerede hjælpemotoreffekter for de faktiske skibe i undersøgelsen beregnet vha. af regressionsligningerne.

For udgravningsfartøjer, forskningsskibe og offshorefartøjer anslås den installerede hjælpemotoreffekt at være 25% af hovedmotorstørrelsen. Tilsvarende figurer for forskningsskibe og offshorefartøjer er vist i Bilag 3.

[3] For krydstogtskibe suppleres Danske Rederiers hovedmotoroplysninger med data indsamlet i det tidligere krydstogtprojekt for Københavns Havn (Jensen et al., 2019)



Figur 4.1. Hovedmotorstørrelse som funktion af bruttotons for de forskellige skibstyper i undersøgelsen.



Figur 4.2. Installeret hjælpemotoreffekt som funktion af bruttotons for de forskellige skibstyper i undersøgelsen.

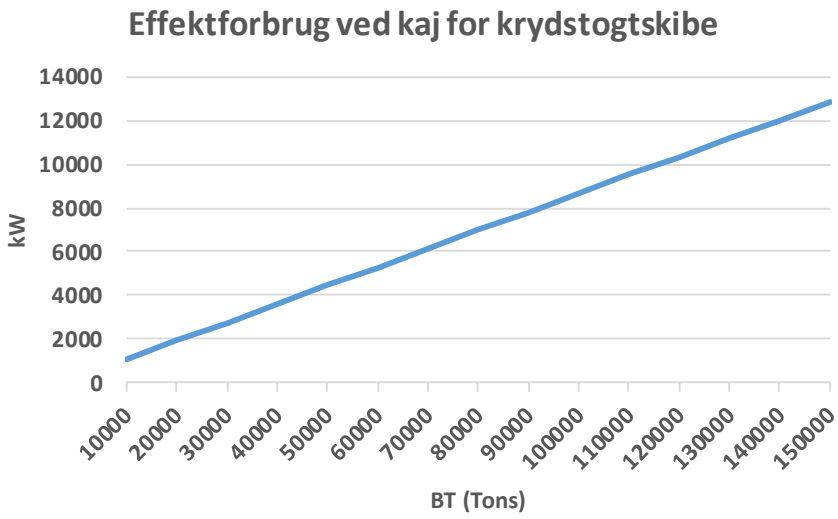
Krydstogtskibe bruger i de fleste tilfælde et dieselelektrisk system, hvor 4-takt medium speed dieselmotorer genererer strøm til elmotorer, der bruges både til skibets fremdrift og skibets effektbehov ved kaj. Krydstogtskibe har et stort elforbrug ombord og den nødvendige leverede motoreffekt ved kaj 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).

$$P = 0,084 \cdot BT + 242,58 \qquad (1)$$

Hvor P=effektforbrug ved kaj (kW) og BT= skibets bruttoton.

Figur 4.3 viser det estimerede effektforbrug ved kaj (kW) som funktion af BT for krydstogtskibene i undersøgelsen.

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).



Figur 4.3. Estimeret effektforbrug ved kaj (kW) som funktion af BT for krydstogtskibene i undersøgelsen.

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)[4]. For de resterende skibstyper ved manøvrering (og alle andre skibstyper end krydstogtskibe ved kaj) er hjælpemotorernes procentvise motorbelastning oplyst af Kristensen (2020).

Tabel 4.1 viser manøvreringstider i havn (timer/anløb), samt motorbelastningsfaktorer (%) for hovedmotorer og hjælpemotorer under manøvrering samt hjælpemotorer ved kaj for opgørelsens forskellige skibstyper.

[4] $P_{Hovedmotor}$ < 10.000 kW: $P_{Hjælpemotor,\ leveret}$ = 0,05·x $P_{Hovedmotor}$ (kW)
$P_{Hovedmotor}$ ≥ 10.000 kW: $P_{Hjælpemotor,\ leveret}$ = 250 + 0,025·x $P_{Hovedmotor}$ (kW)

Tabel 4.1. Manøvreringstider i havn (timer/anløb), samt motorbelastningsfaktorer (%) for hovedmotorer og hjælpemotorer under manøvrering samt hjælpemotorer ved kaj for opgørelsens forskellige skibstyper.

Skibstype	Manøvreringstid	Motorbelastning, manøvrering		Motorbelastning, kaj	
	Timer/anløb	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
Forskningsskibe	0,5	10	25	0	25
General cargo	0,5	10	kW beregnet (IMO formel)	0	25
Krydstogtskibe[5]	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 og Aarhus Havn i perioden 2015-2019, har scrubber ombord. Skibe med scrubber ombord og dato for installation er bestemt ved at krydstjekke en global opgørelse over bulk-, container- og tankskibe med scrubber ombord (uden tidspunkt for installation) publiceret af Environmental Protection Alliance (EPA; http://epawpweb.azurewebsites.net) med yderligere oplysninger om tidspunkt (år/måned) for installation af scrubber fra rederier med stor aktivitet i Københavns Havn og Aarhus Havn (Mærsk: Norderud-Poulsen, 2020; MSC: Fog, 2020)[6].

Krydstjekket viste, at EPA's liste var for upræcis at bruge direkte i emissionsopgørelsen. Ifølge rederiernes oplysninger fik alle fartøjer fra de to rederier, der kunne genfindes i de to havnes anløbslister – på nær et containerskib –

[5] For Rønne Havn bruges en manøvreringstid på 45 min. (Lindberg, 2020).

[6] Derudover blev specifikke oplysninger om scrubber ombord indhentet for DFDS færger og ro-ro cargoskibe, der anløber Københavns Havn.

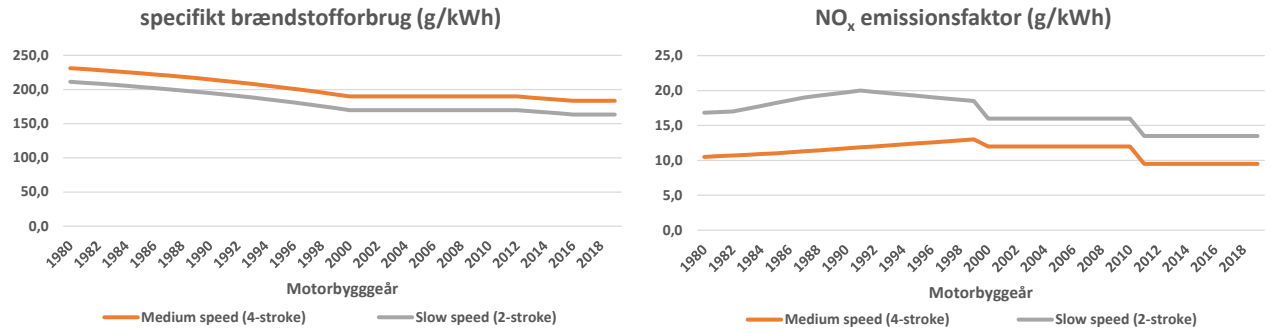
først scrubber installeret i 2019 efter det sidste anløb af skibet, eller senere i 2020.

En følsomhedsberegning viste, at 2% af alle anløb af andre skibe end krydstogtskibe var scrubberudrustede skibe i de to havne, hvis EPA's liste blev brugt direkte. Ud fra rederiernes skibsantal blev anløbsandelen beregnet til 1 %. Forskellen i anløbsandele beregnet med de to metoder er lille, og derfor er det konservativt valgt kun at bruge rederiernes scrubberoplysninger i projektet.

4.2 Specifik energiforbrug og emissionsfaktorer

Figur 4.4 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)[7]. Justeringsfaktorerne for sfc, NO_x, $PM_{2,5}$ og VOC (flygtige organiske kulbrinter) ved 10%, 25% og 40% motorbelastning fremgår af fodnoten.



Figur 4.4. 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:

$$EF_{PM,HFO}(g/kWh) = 1.35 + (sfc \cdot 7 \cdot 0.02247 \cdot (S\%/100 - 0.0246)) \quad (2)$$

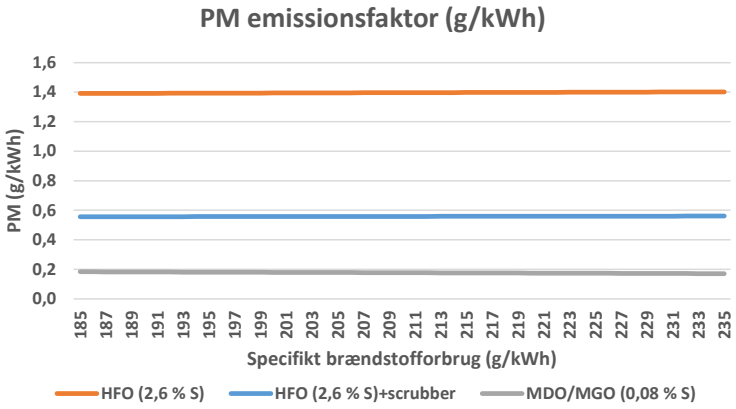
$$EF_{PM,MDO}(g/kWh) = 0.23 + (sfc \cdot 7 \cdot 0.02247 \cdot (S\%/100 - 0.0024)) \quad (3)$$

[7] 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); VOC(2,20/1,0/1,0)

Hvor EF_{PM}=PM-emissionsfaktoren (g/kWh), sfc = specifikt brændstofforbrug (Figur 4.4) 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 4.5 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 brændstoftypen 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, 2020b).



Figur 4.5. PM-emissionsfaktorer for HFO, HFO+scrubber og MGO/MDO som funktion af specifikt brændstofforbrug benyttet for skibene i undersøgelsen.

CH_4-emissionsfaktoren for HFO og MDO/MGO er 0,015 g/kWh, afledt af en CH_4-fraktion af VOC på 0,03 (EMEP/EEA, 2019). VOC-emissionsfaktoren for HFO og MDO/MGO er 0,5 g/kWh og kommer fra Transportministeriets TEMA2015 model (2015). For LNG (Liquified Natural Gas) bruges en CH_4-emissionsfaktor på 2,442 g/kWh oplyst af Bengtsson et al. (2011).

Som CO_2-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). Som N_2O-emissionsfaktorer for HFO og MDO/MGO bruges 0,08 g/kg hentet fra IPCC (2006).

Emissionsfaktorerne for CO_2, CH_4 og N_2O samt nedre brændværdier pr. brændstoftype er vist i Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Emissionsfaktorerne for CO_2, CH_4 og N_2O samt nedre brændværdier pr. brændstoftype anvendt i undersøgelsen

Brændstof-	CO_2 Kg/GJ	CH_4 g/kWh	N_2O g/kg	LHV MJ/kg
HFO	78	0,015	0,08	40,9
MDO/MGO	74	0,015	0,08	42,7
LNG	56,8	2,442	-	47,9

4.3 Beregningsmetode for energiforbrug og emissioner

Energiforbrug og emissioner beregnes på forskellig måde for krydstogtskibe og andre skibe end krydstogtskibe for ophold ved kaj eller under manøvrering samt specifikt for tankskibes oliepumpning. En detaljeret beskrivelse heraf er i bilag 6.

4.4 Energiforbrug og emissioner

I forbindelse med luftkvalitetsberegninger anvendes de detaljerede emissionsoplysninger om det enkelte skib. I dette kapitel vises totale energiforbrug og emissionsresultater fordelt pr. år og skibstyper.

4.4.1 Københavns Havn

Anløb, energiforbrug og emissioner pr. skibstype

Tabel 4.3 viser antallet af skibsanløb i Københavns Havn for 2019, og det beregnede energiforbrug og emissioner fordelt på aktivitet (manøvrering/ved kaj), skibstype og brændstoftype (HFO, MDO/MGO og LNG). I bilag 4 vises tilsvarende resultater for 2015-2018.

Figur 4.6 viser de samlede energiforbrug og CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner i Københavns Havn i perioden 2015-2019 fordelt på skibstyper. I bilag 4 vises tilsvarende resultater for 2015-2018 men mere detaljeret.

De største kilder i havnen i alle år er krydstogtskibe, fulgt af tankskibes oliepumpning (losning af olieprodukter), passagerskibe, tankskibe, containerskibe og general cargo (Tabel 4.3 og Figur 4.6). 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 4.6 (højre del).

Pr. skibstype i 2019 beregnes følgende resultater for energiforbrug, CO_{2eq}, NO_x og $PM_{2.5}$ (procentandele i parentes) for krydstogtskibe (56%, 57%, 50%, 71 %), 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%).

Langt hovedparten af luftforureningen sker ved kaj, og luftforureningen under manøvrering udgør en mindre del. 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), CO_2-, NO_x- og $PM_{2.5}$-emissioner på hhv. 3%, 8%, 8%, 8% og 8% for Københavns Havn i 2019.

Tabel 4.3. Antal skibsanløb i Københavns Havn i 2019, og det beregnede energiforbrug og emissioner fordelt på aktivitet (manøvrering/ved kaj), skibstype og brændstoftype (HFO, MDO/MGO og LNG).

Aktivitet	Skibstype	Brændstoftype	Anløb	Tid	MWh	Brændstofforbrug		NO_x	$PM_{2,5}$	CO_2	CH_4	N_2O	CO_2eq
			Antal	Timer	MWh	tons	GJ	kg	kg	tons	kg	kg	tons
Manøvr.	Bulkskibe	MDO/MGO	27	14	8,5	1,8	78	129	2	6	0,2	0,1	6
Manøvr.	Containerskibe	MDO/MGO	280	140	224,5	48,6	2077	3733	51	154	6,2	3,9	155
Manøvr.	Flydekraner	MDO/MGO	1	1	0,1	0,0	1	2	0	0	0,0	0,0	0
Manøvr.	Forskningsskibe	MDO/MGO	45	23	14,6	3,1	132	240	3	10	0,4	0,2	10
Manøvr.	General cargo	MDO/MGO	384	192	54,9	13,0	557	745	12	41	1,5	1,0	42
Manøvr.	Offshorefartøjer	MDO/MGO	13	7	4,4	0,9	40	70	1	3	0,1	0,1	3
Manøvr.	Passagerskibe	HFO	180	90	359,8	87,3	3570	4768	243	278	9,3	7,0	281
Manøvr.	Passagerskibe	MDO/MGO	170	85	345,0	84,9	3624	4440	73	268	8,8	6,8	270
Manøvr.	Ro-ro cargo	MDO/MGO	203	102	151,5	35,6	1520	2180	34	112	4,3	2,8	113
Manøvr.	Slæbebåde	MDO/MGO	231	116	133,1	28,9	1233	1571	23	91	2,0	2,3	92
Manøvr.	Tankskibe	MDO/MGO	597	299	120,5	25,6	1095	1877	27	81	3,3	2,1	82
Manøvr.	Uddybningsfartøjer	MDO/MGO	514	257	49,4	11,2	478	892	11	35	1,3	0,9	36
Manøvr.	Krydstogtskibe	HFO	170	85	1035,5	220,2	9005	11041	568	702	15,5	17,6	708
Manøvr.	Krydstogtskibe	LNG	2	1	4,8	1,0	49	7	0	3	11,6	0,0	3
Manøvr.	Krydstogtskibe	MDO/MGO	178	89	765,5	174,4	7445	8245	135	551	11,0	13,9	555
Manøvr.	Total		2995	1498	3272,2	736,6	30903	39941	1183	2336	75,5	58,8	2356
Ved kaj	Bulkskibe	MDO/MGO	27	1387	487,6	87,5	3735	7316	89	276	7,3	7,0	279
Ved kaj	Containerskibe	MDO/MGO	280	3996	2583,3	486,0	20750	37162	465	1536	38,8	38,9	1548
Ved kaj	Flydekraner	MDO/MGO	1	158	16,2	3,1	134	184	3	10	0,2	0,3	10
Ved kaj	Forskningsskibe	MDO/MGO	45	2761	758,9	136,1	5813	11638	138	430	11,4	10,9	434
Ved kaj	General cargo	MDO/MGO	384	10795	2320,2	471,1	20115	27891	409	1489	34,8	37,7	1501
Ved kaj	Offshorefartøjer	MDO/MGO	13	636	172,4	31,0	1323	2697	31	98	2,6	2,5	99
Ved kaj	Passagerskibe	HFO	180	1258	1651,5	354,7	14506	19346	909	1131	24,8	28,4	1141
Ved kaj	Passagerskibe	MDO/MGO	170	1173	1656,0	362,1	15461	18925	285	1144	24,8	29,0	1153
Ved kaj	Ro-ro cargo	MDO/MGO	203	378	174,9	35,3	1508	2188	31	112	2,6	2,8	112
Ved kaj	Slæbebåde	MDO/MGO	231	11987	635,5	129,5	5529	7404	112	409	9,5	10,4	412
Ved kaj	Tankskibe	MDO/MGO	597	11369	3415,3	626,8	26763	48192	618	1980	51,2	50,1	1997
Ved kaj	Tankskibe pumpning	MDO/MGO	315	7404	7682,5	1391,7	59424	111545	1395	4397	115,2	111,3	4433
Ved kaj	Uddybningsfartøjer	MDO/MGO	514	2606	186,9	37,2	1587	2688	33	117	2,8	3,0	118
Ved kaj	Krydstogtskibe	HFO	170	2063	16854,4	3157,3	129133	174931	9239	10072	253	253	10154
Ved kaj	Krydstogtskibe	LNG	2	59	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	0
Ved kaj	Krydstogtskibe	MDO/MGO	178	2324	11265,7	2258,9	96456	122597	1992	7138	163	181	7196
Ved kaj	Total		3310	60355	49861,3	9568,1	402237	594704	15750	30340	741,7	765,4	30587
Samlet	Bulkskibe	MDO/MGO	27	1401	496,0	89,3	3813	7445	91	282	7,5	7,1	284
Samlet	Containerskibe	MDO/MGO	280	4136	2807,9	534,6	22827	40895	516	1689	44,9	42,8	1703
Samlet	Flydekraner	MDO/MGO	1	159	16,3	3,2	135	186	3	10	0,2	0,3	10
Samlet	Forskningsskibe	MDO/MGO	45	2783	773,5	139,2	5946	11878	141	440	11,8	11,1	444
Samlet	General cargo	MDO/MGO	384	10987	2375,2	484,1	20672	28636	421	1530	36,3	38,7	1542
Samlet	Offshorefartøjer	MDO/MGO	13	643	176,8	31,9	1363	2767	32	101	2,7	2,6	102
Samlet	Passagerskibe	HFO	180	1348	2011,4	442,0	18076	24115	1152	1410	34,1	35,4	1421
Samlet	Passagerskibe	MDO/MGO	170	1258	2001,1	446,9	19084	23365	358	1412	33,7	35,8	1424
Samlet	Ro-ro cargo	MDO/MGO	203	480	326,3	70,9	3028	4368	65	224	6,9	5,7	226
Samlet	Slæbebåde	MDO/MGO	231	12103	768,6	158,4	6762	8974	135	500	11,5	12,7	504
Samlet	Tankskibe	MDO/MGO	597	11668	3535,7	652,4	27859	50068	646	2062	54,5	52,2	2078
Samlet	Tankskibe pumpning	MDO/MGO	315	7404	7682,5	1391,7	59424	111545	1395	4397	115,2	111,3	4433
Samlet	Uddybningsfartøjer	MDO/MGO	514	2863	236,3	48,3	2064	3579	44	153	4,1	3,9	154
Samlet	Krydstogtskibe	HFO	170	2148	17889,9	3377,5	138138	185973	9806	10775	268,3	270,2	10862
Samlet	Krydstogtskibe	LNG	2	60	4,8	1,0	49	7	0	3	11,6	0,0	3
Samlet	Krydstogtskibe	MDO/MGO	178	2413	12031,2	2433,3	103901	130843	2127	7689	173,7	194,7	7751
Samlet	Grand total		3310	61853	53133,4	10304,7	433140	634645	16934	32676	817,2	824,3	32942

Figur 4.6. Energiforbrug (GJ) og CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2.5}$-emissioner fra skibe i Københavns Havn for 2015-2019 fordelt på krydstogtskibe, andre skibe og tankskibes oliepumpning, og fordelt på skibstyper. Krydstogtskibene er ikke inkluderet i figurerne til højre, da bidraget er meget stort for krydstogtskibe, hvilket ville gøre, at man ikke kan se bidraget fra de andre skibe.

Udviklingen i CO_2-emissionerne følger udviklingen i energiforbruget. De totale CO_2-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 CO_{2eq}-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 CO_{2eq}-emissionerne er især drevet af krydstogtskibenes emissionsvækst (Figur 4.6). Krydstogtskibenes CO_{2eq}-emissioner stiger med 34% i perioden 2015-2019 pga. stigningen i antallet af anløb med stadig større krydstogtskibe. Omvendt

falder CO_{2eq}-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 CO_{2eq}-emissionen for krydstogtskibene, fordi krydstogtskibene gennemsnitlig set bliver nyere i perioden og har gradvist lavere NO_x-emissionsfaktorer. 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 SO_2 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. $PM_{2.5}$-emissionerne fra andre skibe og oliepumpning falder med hhv. 8% og 16% i perioden.

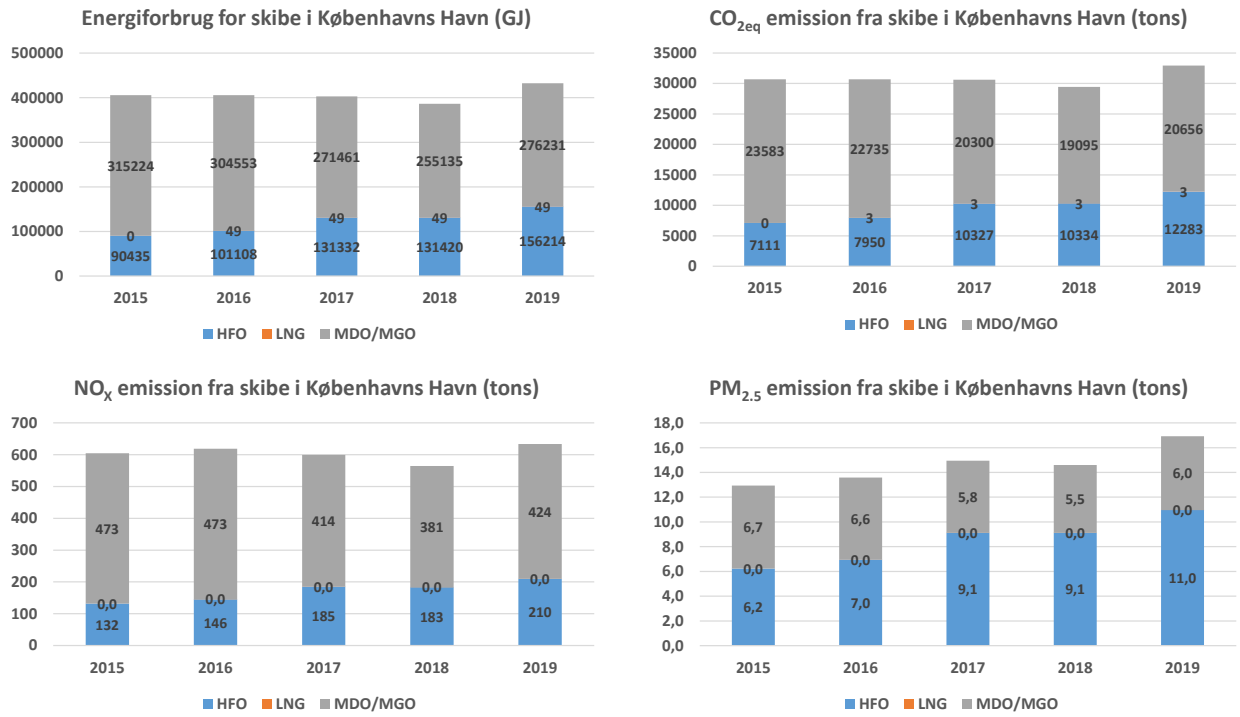
Emissionerne fra tankskibes oliepumpning svinger fra år til år afhængig af mængden af olie, der losses i havnen. Emissionerne er størst i 2016 og mindst i 2018 med en forskel på hhv. 63%, 62% og 63% for CO_{2eq}, NO_x og $PM_{2,5}$. Emissionerne fra andre skibe (alle andre skibe end krydstogtskibe, Figur 4.6), svinger også fra år til år. CO_{2eq}*[NO_x, $PM_{2.5}$]*-emissionerne er størst i 2015 og mindst i 2018, med en forskel på 27%*[22%, 19%]*.

Energiforbrug og emissioner fordelt på brændstoftyper

Figur 4.7 viser de samlede energiforbrug og CO_{2eq}-, 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 CO_{2eq}-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%. For krydstogtskibene alene stiger HFO forbruget med 90 % fra 2015-2019.

I 2019 udgør HFO, MDO/MGO og LNG forbruget hhv. 36%, 64% og 0% af det samlede energiforbrug. De HFO relaterede CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner udgør hhv. 37%, 33% og 65% af de samlede emissioner i 2019, og for MDO/MGO bliver CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissionsandelene hhv. 63%, 67 % og 35%.

Krydstogtskibenes andel af HFO-forbruget og de HFO relaterede CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner beregnes til hhv. 88%, 88%, 89% og 89% i 2019.

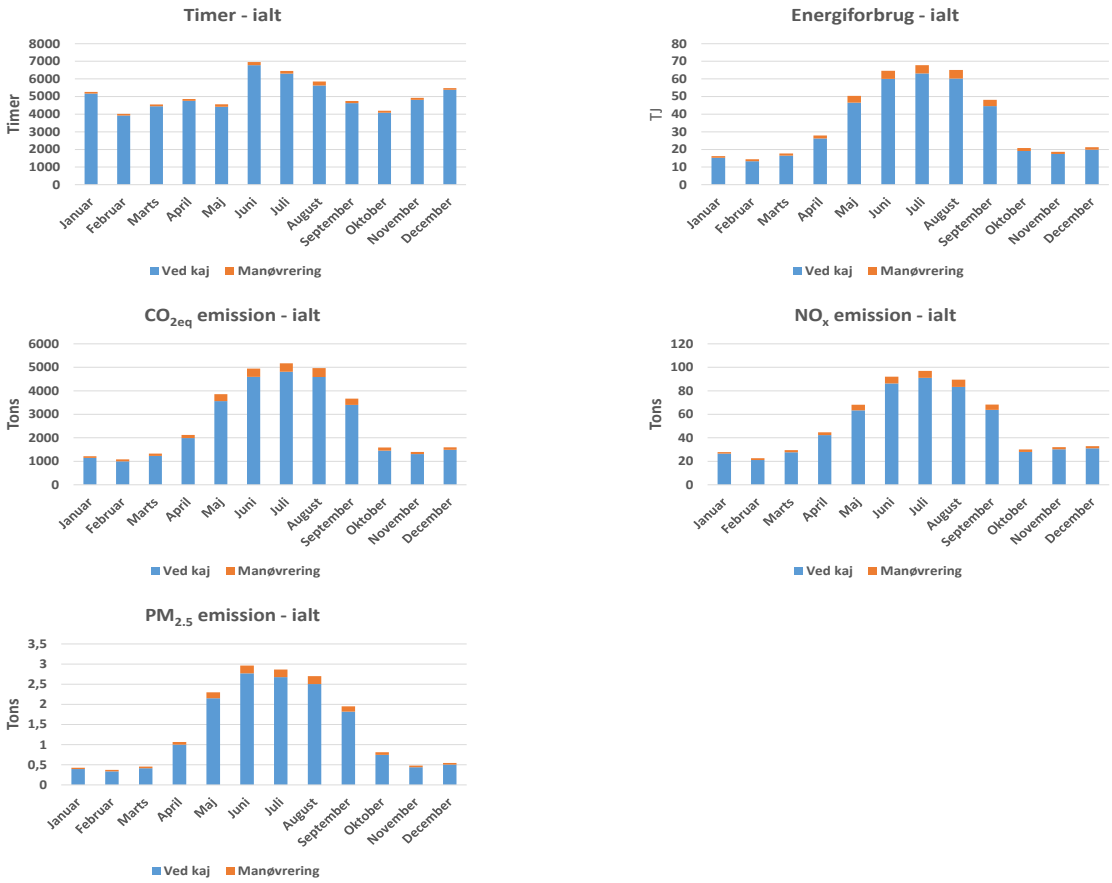


Figur 4.7. Energiforbrug (GJ), CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner fra skibe i Københavns Havn 2015-2019 fordelt på brændstoftyper.

Timer, energiforbrug og emissioner fordelt pr. måned og aktivitet

Figur 4.8 viser det samlede antal timer og de beregnede energiforbrug, CO_{2eq}-NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner i Københavns Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj). I bilag 2 er figurerne også vist pr. skibstype.

De beregnede energiforbrug og emissioner pr. måned afhænger af skibsmotorstørrelser, brændstoftype, antal timer ved kaj/manøvrering, og de specifikke energiforbrugs- og emissionsfaktorer for skibene der benytter havnen i de enkelte måneder.



Figur 4.8. Antal timer i alt og emissioner for skibe i Københavns Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).

4.4.2 Aarhus Havn

Anløb, energiforbrug og emissioner pr. skibstype

Tabel 4.4 viser antallet af skibsanløb i Aarhus Havn 2019 og det beregnede energiforbrug og emissioner fordelt på aktivitet (manøvrering/ved kaj), skibstype og brændstoftype (HFO og MDO/MGO). I bilag 4 vises tilsvarende resultater for 2015-2018.

Figur 4.9 viser de samlede energiforbrug og CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner i Aarhus Havn i perioden 2015-2019 totalt og fordelt på skibstyper.

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

Pr. skibstype i 2019 beregnes følgende resultater for energiforbrug, CO_{2eq}, NO_x og $PM_{2.5}$ (procentandele i parentes) for containerskibe (28%, 28%, 34%, 28%), passagerskibe (21%, 21%, 19%, 21%), bulkskibe (16%, 16%, 16%, 14%), tankskibes oliepumpning (9%, 9%, 9%, 9%) og general cargo (8%, 8%, 7%, 7%). Følgende resultater for energiforbrug, CO_{2eq}, NO_x og $PM_{2.5}$ (procentandele i parentes) beregnes for tankskibe (6%, 6%, 6%, 6%), krydstogtskibe (5%, 5%, 4%, 9%), ro-ro cargo (3%, 3%, 2%, 2%), øvrige skibe (2%, 2%, 1%, 1%) og slæbebåde (1%, 1%, 1%, 1%).

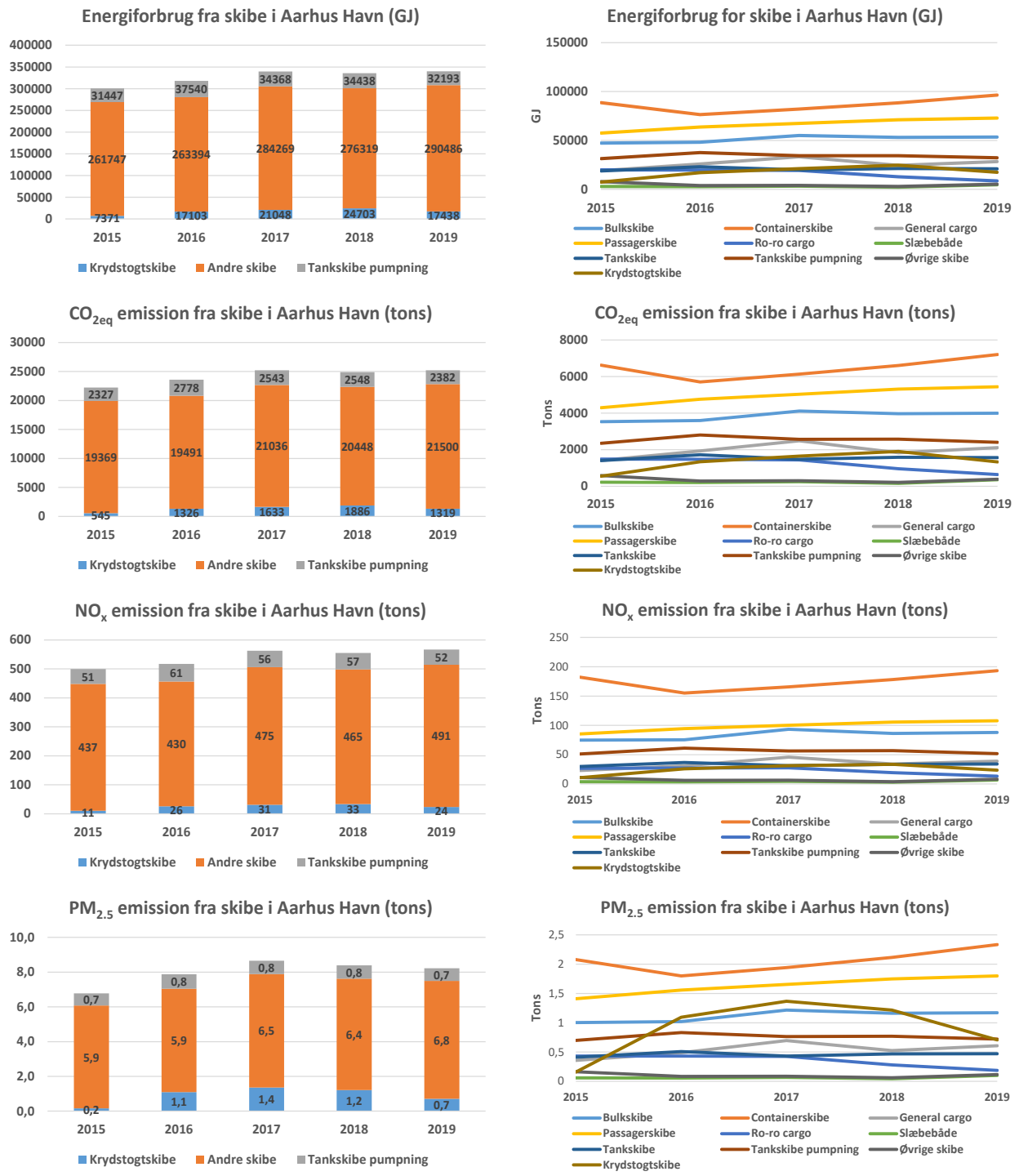
Hovedparten af luftforureningen sker ved kaj, og luftforureningen under manøvrering udgør en mindre del. For manøvrering er andelen af timer dog mindre end andelen af energiforbrug og emissioner set i forhold til de samlede totaler pga. det større kW forbrug for skibe ved manøvrering i forhold til kW forbruget ved kaj.

Emissionsandelene for manøvrering er yderligere større for Aarhus Havn sammenlignet med Københavns Havn. Årsagen er, at trafikken i Aarhus Havn er meget domineret af Molslinjens færger (passagerskibe), der i Aarhus Havn har meget korte opholdstider og meget lav hjælpemotoreffekt ved kaj (Nielsen, 2020) i forhold til andre skibstyper.

Samlet set beregnes manøvreringsandele for tidsforbrug, energiforbrug (GJ), CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2.5}$-emissioner på hhv. 2%, 26%, 26%, 23% og 26% for Aarhus Havn i 2019.

Tabel 4.4. Antal skibsanløb i Aarhus Havn i 2019 og det beregnede energiforbrug og emissioner fordelt på aktivitet (manøvrering/ved kaj), skibstype og brændstoftype (HFO, MDO/MGO og LNG).

Aktivitet	Skibstype	Brændstoftype	Anløb	Tid	MWh	Brændstofforbrug		NO_x	$PM_{2,5}$	CO_2	CH_4	N_2O	CO_{2eq}
			Antal	Timer	MWh	tons	GJ	kg	kg	tons	kg	kg	tons
Manøvr.	Bulkskibe	MDO/MGO	681	341	95,5	21,1	901	1433	21	67	2,6	1,7	67
Manøvr.	Containerskibe	HFO	1	1	4,2	0,8	34	79	3	3	0,1	0,1	3
Manøvr.	Containerskibe	MDO/MGO	788	394	741,8	158,6	6774	12474	170	501	20,7	12,7	506
Manøvr.	General cargo	MDO/MGO	76	38	4,9	1,0	44	79	1	3	0,1	0,1	3
Manøvr.	Passagerskibe	MDO/MGO	3728	1864	6960,4	1590,8	67926	100790	1693	5026	223,4	127,3	5070
Manøvr.	Øvrige skibe	MDO/MGO	121	61	11,6	2,5	105	179	3	8	0,3	0,2	8
Manøvr.	Ro-ro cargo	MDO/MGO	120	60	90,4	20,4	871	1377	21	64	2,7	1,6	65
Manøvr.	Tankskibe	MDO/MGO	337	169	69,6	15,0	642	1028	16	48	1,9	1,2	48
Manøvr.	Slæbebåde	MDO/MGO	62	31	49,8	10,3	438	604	9	32	0,7	0,8	33
Manøvr.	Krydstogtskibe	HFO	11	6	57,9	12,4	507	644	32	40	0,9	1,0	40
Manøvr.	Krydstogtskibe	MDO/MGO	21	11	99,9	22,9	978	1147	18	72	1,5	1,8	73
Manøvr.	Total		5946	2973	8186,0	1855,8	79221	119834	1985	5864	254,9	148,5	5915
Ved kaj	Bulkskibe	MDO/MGO	681	29537	6424,5	1230,6	52548	86496	1150	3889	96,4	98,5	3920
Ved kaj	Containerskibe	HFO	1	23	120,5	20,9	855	1970	66	67	1,8	1,7	67
Ved kaj	Containerskibe	MDO/MGO	788	9745	11528,4	2079,3	88788	178693	2096	6570	172,9	166,3	6624
Ved kaj	General cargo	MDO/MGO	76	59046	3409,1	662,0	28266	39061	608	2092	51,1	53,0	2109
Ved kaj	Passagerskibe	MDO/MGO	3728	4922	602,0	114,6	4892	7244	108	362	9,0	9,2	365
Ved kaj	Øvrige skibe	MDO/MGO	121	13375	627,2	118,5	5060	7985	113	374	9,4	9,5	378
Ved kaj	Ro-ro cargo	MDO/MGO	120	2577	932,1	180,2	7692	12083	167	569	14,0	14,4	574
Ved kaj	Tankskibe	MDO/MGO	337	7546	2529,5	476,7	20357	33133	455	1506	37,9	38,1	1519
Ved kaj	Tankskibe pumpning	MDO/MGO	258	6096	4007,5	753,9	32193	51941	721	2382	60,1	60,3	2402
Ved kaj	Slæbebåde	MDO/MGO	62	11121	516,0	100,5	4292	6093	92	318	7,7	8,0	320
Ved kaj	Krydstogtskibe	HFO	11	122	852,8	161,3	6598	9491	468	515	13	13	519
Ved kaj	Krydstogtskibe	MDO/MGO	21	201	1085,8	219,1	9355	12384	192	692	16	18	698
Ved kaj	Total		6204	144312	32635,2	6117,7	260896	446574	6235	19336	489,1	489,4	19494
Samlet	Bulkskibe	MDO/MGO	681	29877	6520,0	1251,7	53449	87929	1172	3955	99,0	100,1	3988
Samlet	Containerskibe	HFO	1	24	124,6	21,7	890	2049	69	69	1,9	1,7	70
Samlet	Containerskibe	MDO/MGO	788	10139	12270,2	2238,0	95562	191167	2266	7072	193,6	179,0	7130
Samlet	General cargo	MDO/MGO	76	59084	3413,9	663,0	28311	39141	609	2095	51,3	53,0	2112
Samlet	Passagerskibe	MDO/MGO	3728	6786	7562,4	1705,3	72817	108034	1801	5388	232,4	136,4	5435
Samlet	Øvrige skibe	MDO/MGO	121	13435	638,9	121,0	5165	8165	115	382	9,7	9,7	385
Samlet	Ro-ro cargo	MDO/MGO	120	2637	1022,5	200,6	8564	13460	188	634	16,6	16,0	639
Samlet	Tankskibe	MDO/MGO	337	7715	2599,0	491,8	20999	34161	470	1554	39,8	39,3	1567
Samlet	Tankskibe pumpning	MDO/MGO	258	6096	4007,5	753,9	32193	51941	721	2382	60,1	60,3	2402
Samlet	Slæbebåde	MDO/MGO	62	11152	565,8	110,8	4730	6697	101	350	8,5	8,9	353
Samlet	Krydstogtskibe	HFO	11	128	910,7	173,7	7105	10135	499	554	13,7	13,9	559
Samlet	Krydstogtskibe	MDO/MGO	21	211	1185,7	242,0	10333	13530	209	765	17,4	19,4	771
Samlet	Total		6204	147285	40821,2	7973,5	340117	566408	8220	25201	744,0	637,9	25409



Figur 4.9. Energiforbrug (GJ) og CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner fra skibe i Aarhus Havn for 2015-2019 fordelt på krydstogtskibe, andre skibe og tankskibes oliepumpning, og fordelt på skibstyper.

For al skibsaktivitet i Aarhus Havn beregnes samlet set det største energiforbrug og NO_x-emission i 2019, og størst CO_{2eq}- og $PM_{2.5}$-emission i 2017. De beregnede emissioner og energiforbrug er dog bemærkelsesvis ens for årene 2017, 2018 og 2019. I det følgende kommenteres fortrinsvis på emissionsudviklingen fra 2015 til 2019.

Udviklingen i CO_{2eq}-emissionerne følger udviklingen i energiforbruget. De totale CO_{2eq}-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 CO_{2eq}-emissioner med 13%. De samlede NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner stiger med hhv. 13% og 21% i samme periode.

Den samlede stigning i CO_{2eq}- og NO_x-emissionerne fra 2015 til 2019 er især drevet af de absolutte emissionsstigninger for passagerskibe, og i lidt mindre grad af stigningen i emissionerne for krydstogtskibe, general cargo skibe, containerskibe og bulkskibe.

De samme fem skibstypers emissionsstigninger for $PM_{2,5}$ fra 2015 til 2019 er også hovedårsagen til den samlede vækst i $PM_{2,5}$-emissionen i Aarhus Havn i samme periode. For $PM_{2,5}$ beregnes de største absolutte emissionsstigninger for krydstogtskibe, fulgt af passagerskibe, containerskibe, general cargo skibe og bulkskibe.

For krydstogtskibe har emissionsbilledet varieret meget i Aarhus Havn i den betragtede periode. De største CO_{2eq} – og NO_x-emissioner beregnes for 2018, året med det største antal anløb af krydstogtskibe (41) i havnen. Fra 2015 til 2018 steg krydstogtskibenes CO_{2eq}- og NO_x-emissioner med hhv. 246% og 213%. I samme periode steg antallet af anløb med 235%.

For krydstogtskibe beregnes den største $PM_{2,5}$-emission i 2017, svarende til en $PM_{2,5}$-emissionsstigning på 763% fra 2015 til 2017. Årsagen til den kraftige $PM_{2,5}$-emissionsstigning er, at Aarhus Havn i 2017 havde det største antal anløb af krydstogtskibe (28), der bruger HFO og har scrubber ombord, i 2015 var der ingen anløb af HFO-forbrugene krydstogtskibe i havnen. Som før nævnt, er $PM_{2,5}$-emissionsfaktorerne for skibe, der bruger HFO med scrubber, omtrent tre gange så store som $PM_{2,5}$-emissionsfaktorerne for skibe, der bruger MDO/MGO.

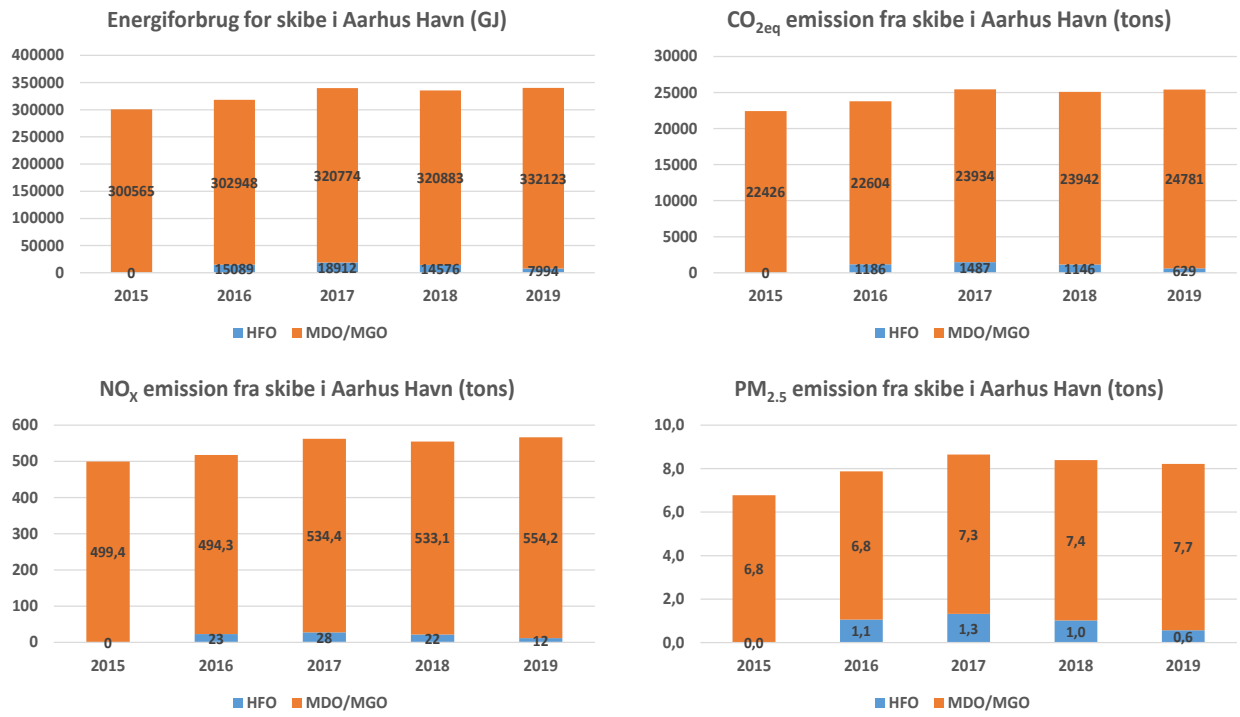
Fra 2015 til 2019 stiger emissionerne fra passagerskibe med hhv. 27%, 26% og 28% for CO_{2eq}, NO_x og $PM_{2,5}$. Emissionerne fra containerskibe er størst i 2019 og mindst i 2016, med en forskel på hhv. 26%, 24% og 30% for CO_{2eq}, NO_x og $PM_{2,5}$ (Figur 13).

Energiforbrug og emissioner fordelt på brændstoftyper

Figur 4.10 viser de samlede energiforbrug og CO_2-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner i Aarhus Havn i perioden 2015-2019 fordelt på brændstoftyper.

Forbruget af HFO udgør kun en lille del af det samlede brændstofforbrug i Aarhus Havn i perioden 2015-2019. HFO-forbruget er størst i 2017, hvor HFO-andelene af de samlede energiforbrug, CO_2-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner beregnes til hhv. 6%, 6%, 5% og 15%.

I 2019 udgør HFO 2% af det samlede energiforbrug og hhv. 2%, 2% og 7% af de samlede CO_2-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner.



Figur 4.10. Energiforbrug (GJ) og CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2.5}$-emissioner fra skibe i Aarhus Havn for 2015-2019 fordelt på brændstoftyper

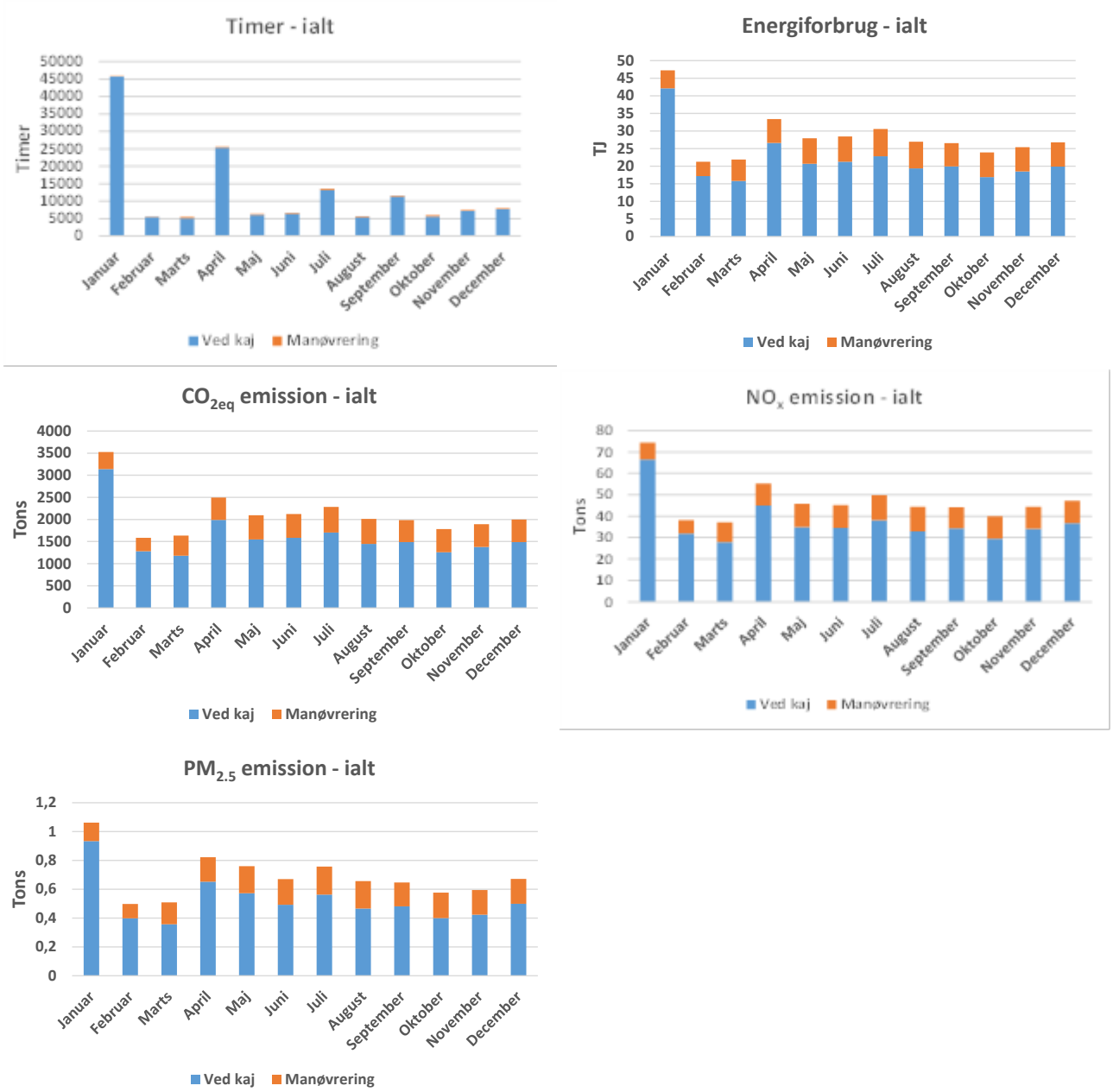
Timer, energiforbrug og emissioner fordelt pr. måned og aktivitet

Figur 4.11 viser i alt antal timer og de beregnede energiforbrug, NO_x-, $PM_{2,5}$- og CO_{2eq}-emissioner i Aarhus Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj). I bilag 2 er figurerne også vist pr. skibstype.

Der er et stort antal timer ved kaj særligt i januar måned og i lidt mindre grad for april måned. Forklaringen er, at general cargo skibe har mange opholdstimer ved kaj i januar og april måned, og at øvrige skibe og slæbebåde har mange kajtimer i hhv. januar og april måned (se bilag 2). De mange timer ved kaj for de nævnte skibstyper betyder, at de største energiforbrug og emissioner beregnes for januar og april måned i Aarhus Havn.

De samlede energiforbrugs- og emissionsandele er dog mindre end timeandelene i de to måneder karakteriseret ved mange kajtimer, idet kW forbruget (og afledte energiforbrug og emissioner) for skibene ved kaj som før nævnt er mindre end for skibene under manøvrering.

For hele året giver det større kW forbrug for skibe ved manøvrering i forhold til kW forbruget ved kaj (og dette gælder i særdeleshed for Molslinjens færger i Aarhus Havn) samlet set anledning til større energiforbrugs- og emissionsandele end timeandele for manøvrering. De beregnede manøvreringsandele for tidsforbrug, energiforbrug (GJ), CO_2-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner er hhv. 4%, 26%, 26%, 23% og 26% for Aarhus Havn i 2019.



Figur 4.11. Antal timer i alt og emissioner for skibe i Aarhus Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).

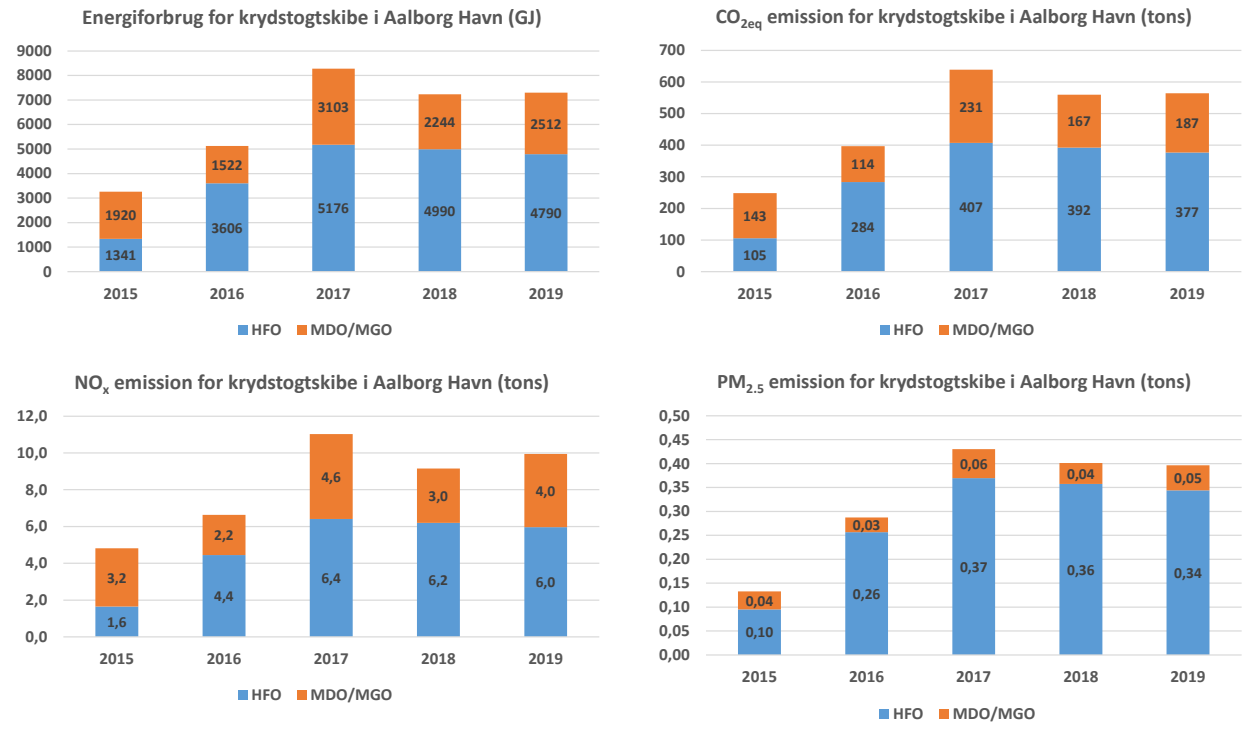
4.4.3 Aalborg Havn

Tabel 4.5 viser antallet af anløb med krydstogtskibe i Aalborg Havn i 2019 og det beregnede energiforbrug og emissioner fordelt på aktivitet (manøvrering/ved kaj) og brændstoftype (HFO og MDO/MGO). I bilag 4 vises tilsvarende resultater for 2015-2018.

Figur 4.12 viser de samlede energiforbrug og CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner i Aalborg Havn i perioden 2015-2019 totalt og fordelt på brændstoftyper.

Tabel 4.5. Antal anløb af krydstogtskibe i Aalborg Havn i 2019 og det beregnede energiforbrug og emissioner fordelt på aktivitet (manøvrering/ved kaj) og brændstoftype (HFO, MDO/MGO).

Aktivitet	Skibstype	Brændstoftype	Anløb	Tid	MWh	Brændstofforbrug		NO_x	$PM_{2,5}$	CO_2	CH_4	N_2O	CO_{2eq}
			Antal	Timer	MWh	tons	GJ	kg	kg	tons	kg	kg	tons
Manøvr.	Krydstogtskibe	HFO	21	11	62,7	13,1	534	596	34	42	0,9	1,0	42
Manøvr.	Krydstogtskibe	MDO/MGO	11	6	24,5	5,4	232	328	4	17	0,4	0,4	17
Manøvr.	Total		32	16	87,2	18,5	766	924	39	59	1	1	59
Ved kaj	Krydstogtskibe	HFO	21	129	565,3	104,1	4256	5370	310	332	8,5	8,3	335
Ved kaj	Krydstogtskibe	MDO/MGO	11	112	270,6	53,4	2279	3646	48	169	4,1	4,3	170
Ved kaj	Total		32	240,5	835,9	157,4	6536	9016	358	501	13	13	505
Samlet	Krydstogtskibe	HFO	21	139	628,0	117,1	4790	5966	344	374	9,4	9,4	377
Samlet	Krydstogtskibe	MDO/MGO	11	118	295,1	58,8	2512	3974	52	186	4,4	4,7	187
Samlet	Grand total		32	256,5	923,1	175,9	7302	9940	396	560	14	14	564



Figur 4.12. Energiforbrug (GJ) og CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner fra krydstogtskibe i Aalborg Havn for 2015-2019 fordelt på brændstoftyper.

For al aktivitet med krydstogtskibe i Aalborg Havn beregnes samlet set de største energiforbrug og emissioner i 2017. Lidt mindre energiforbrug og emissioner beregnes i 2018 og 2019, hvor de totale resultater er meget ens.

Udviklingen i CO_{2eq}-emissionerne følger udviklingen i energiforbruget. De totale CO_{2eq}-emissioner stiger med 157% fra 2015 til 2017. Fra 2015 til 2019 er emissionsstigningen 127%.

De samlede NO_x- og $PM_{2.5}$-emissioner stiger med hhv. 129% og 224% fra 2015 til 2017 og med hhv. 106% og 198% fra 2015 til 2019 (Figur 4.12).

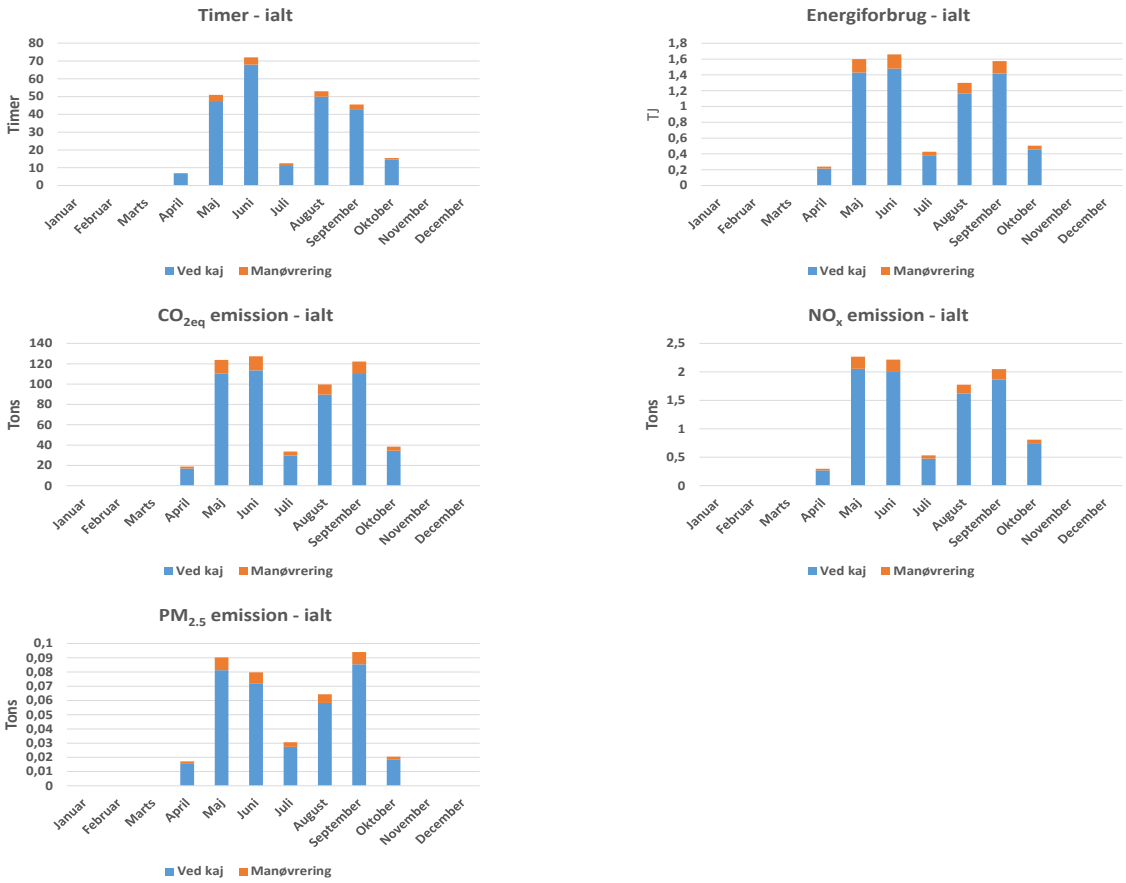
Årsagen til den kraftige $PM_{2.5}$-emissionsstigning fra 2015 til 2017, 2018 og 2019 er, at der i Aalborg Havn i 2017, 2018 og 2019 var hhv. 22, 22 og 21 anløb af krydstogtskibe, der bruger HFO og har scrubber ombord; i 2015 og 2016 var der kun hhv. 5 og 7 anløb af HFO-forbrugende krydstogtskibe i havnen. Som før nævnt er $PM_{2,5}$-emissionsfaktorerne for skibe, der bruger HFO med scrubber, omtrent tre gange så store som $PM_{2,5}$-emissionsfaktorerne for skibe, der bruger MDO/MGO.

Forbruget af HFO stiger med hhv. 286% og 257% i Aalborg Havn fra 2015 til hhv. 2017 og 2019. HFO-forbruget er størst i 2017, hvor HFO-andelene af de samlede energiforbrug, CO_2-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner beregnes til hhv. 63%, 64%, 58% og 86%.

I 2019 udgør HFO-andelene 66% af det samlede energiforbrug og hhv. 67%, 60% og 87% af de samlede CO_2-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner.

Timer, energiforbrug og emissioner fordelt pr. måned og aktivitet

Figur 4.13 viser i alt antal timer og de beregnede energiforbrug, NO_x-, $PM_{2,5}$- og CO_{2eq}-emissioner for krydstogtskibe i Aalborg Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).



Figur 4.13. Antal timer i alt og emissioner for krydstogtskibe i Aalborg Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).

Månedsudviklingerne i timeantal og energiforbrug/emissioner er ikke helt proportionale for krydstogtskibene i Aalborg Havn, fordi skibene, der anløb havnen i juni, i gennemsnit var noget mindre, og skibene, der anløb havnen i september, i gennemsnit var noget større, end skibene, der anløb havnen i de øvrige måneder.

Det større kW forbrug for krydstogtskibe ved manøvrering i forhold til kW forbruget ved kaj giver større energiforbrugs- og emissionsandele end timeandele for manøvrering i Aalborg Havn. I 2019 er de beregnede manøvreringsandele for tidsforbrug, energiforbrug (GJ), CO_2-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner hhv. 6%, 10%, 11%, 9% og 10%.

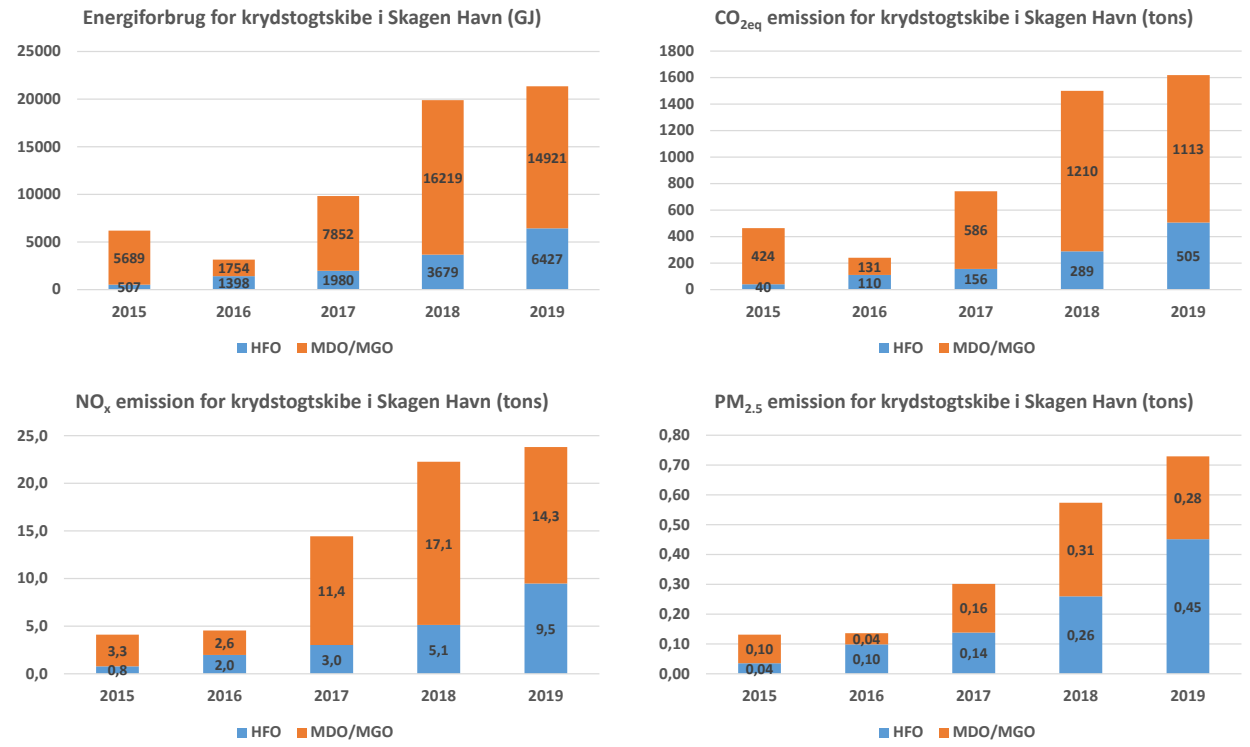
4.4.4 Skagen Havn

Tabel 4.6 viser antallet af anløb med krydstogtskibe i Skagen Havn i 2019 og det beregnede energiforbrug og emissioner fordelt på aktivitet (manøvrering/ved kaj) og brændstoftype (HFO og MDO/MGO). I bilag 4 vises tilsvarende resultater for 2015-2018.

Figur 4.14 viser de samlede energiforbrug og CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner i Skagen Havn i perioden 2015-2019 totalt og fordelt på brændstoftyper.

Tabel 4.6. Antal anløb af krydstogtskibe i Skagen Havn i 2019 og det beregnede energiforbrug og emissioner fordelt på aktivitet (manøvrering/ved kaj) og brændstoftype (HFO, MDO/MGO).

Aktivitet	Skibstype	Brændstoftype	Anløb	Tid	MWh	Brændstofforbrug		NO_x	$PM_{2,5}$	CO_2	CH_4	N_2O	CO_{2eq}
			Antal	Timer	MWh	tons	GJ	kg	kg	tons	kg	Kg	tons
Manøvr.	Krydstogtskibe	HFO	13	7	72,2	15,5	632	844	40	49	1,1	1,2	50
Manøvr.	Krydstogtskibe	MDO/MGO	28	14	132,9	32,2	1374	1207	23	102	1,8	2,6	102
Manøvr.	Total		41	21	205,1	47,6	2006	2051	63	151	3	4	152
Ved kaj	Krydstogtskibe	HFO	13	110	750,6	141,7	5795	8627	412	452	11,3	11,3	456
Ved kaj	Krydstogtskibe	MDO/MGO	28	256	1470,9	317,3	13547	13120	255	1003	19,4	25,4	1011
Ved kaj	Total		41	366	2221,5	458,9	19342	21748	666	1454	31	37	1466
Samlet	Krydstogtskibe	HFO	13	117	822,8	157,1	6427	9471	451	501	12,3	12,6	505
Samlet	Krydstogtskibe	MDO/MGO	28	270	1603,8	349,4	14921	14328	278	1104	21,2	28,0	1113
Samlet	Grand total		41	387	2426,6	506,6	21348	23799	729	1605	33	41	1618



Figur 4.14. Energiforbrug (GJ) og CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner fra krydstogtskibe i Skagen Havn for 2015-2019 fordelt på brændstoftyper.

For al aktivitet med krydstogtskibe i Skagen Havn beregnes samlet set de største energiforbrug og emissioner i 2019.

Udviklingen i CO_{2eq}-emissionerne følger udviklingen i energiforbruget. De totale CO_{2eq}-emissioner stiger med 577% fra 2016 til 2019. Fra 2015 til 2019 er emissionsstigningen 245%.

Kraftigt vækst i NOx- og PM2,5 i Skagen Havn

De samlede NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner stiger med hhv. 479% og 457% fra 2015 til 2019 (Figur 4.18).

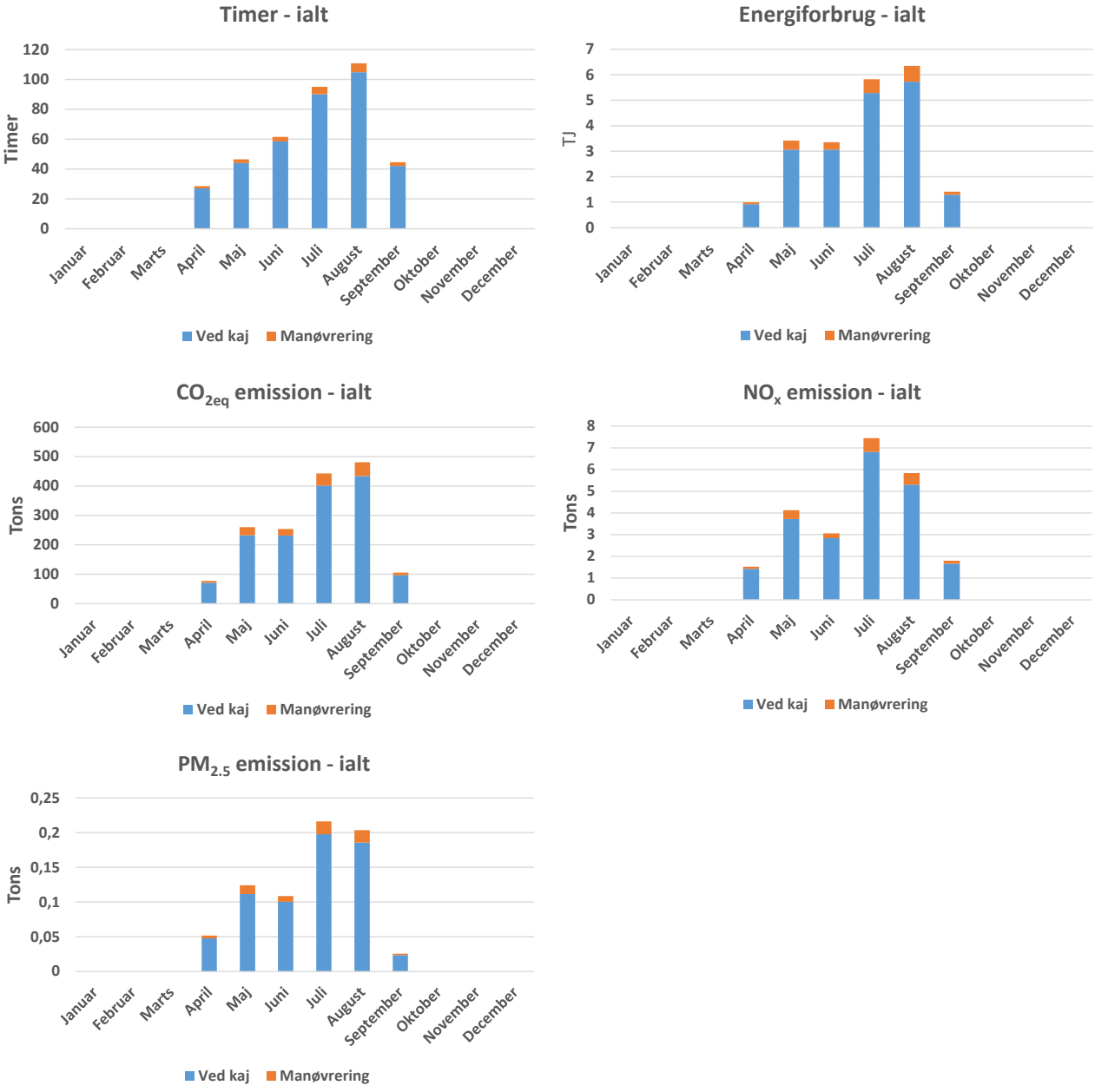
NO_x-emissionerne stiger kraftigt fra 2015 til 2019, fordi der i 2015 var et relativt stort anløb af krydstogtskibe med gasturbinemotor, der er karakteriseret ved meget lave NO_x-emissionsfaktorer.

Årsagen til den kraftige $PM_{2,5}$-emissionsstigning fra 2015 til 2019 i Skagen Havn skyldes især, at antallet af anløb med krydstogtskibe, der bruger HFO og har scrubber ombord, stiger fra et anløb i 2015 til 13 anløb i 2019. Som før nævnt, er $PM_{2,5}$-emissionsfaktorerne for skibe der bruger HFO med scrubber omtrent tre gange så store som $PM_{2,5}$-emissionsfaktorerne for skibe, der bruger MDO/MGO.

Forbruget af HFO stiger med 1168% i Skagen Havn fra 2015 til 2019. I 2019 udgør HFO-andelene 66% af det samlede energiforbrug og hhv. 67%, 60% og 87% af de samlede CO_2-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner.

Timer, energiforbrug og emissioner fordelt pr. måned og aktivitet

Figur 4.15 viser i alt antal timer og de beregnede energiforbrug, NO_x-, $PM_{2,5}$- og CO_{2eq}-emissioner i Skagen Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).



Figur 4.15. Antal timer i alt og emissioner for krydstogtskibe i Skagen Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).

Udviklingen i de samlede emissioner følger stort set udviklingen i det samlede energiforbrug for krydstogtskibene henover årets måneder i Skagen Havn. Udviklingerne i timeantal og energiforbrug/emissioner er ikke helt proportionale, fordi skibene, der anløb havnen i april og september, i gennemsnit var noget mindre end skibene, der anløb havnen i de øvrige måneder, og i særlig grad mindre end skibene, der anløb havnen i maj måned.

Det større kW forbrug for krydstogtskibe ved manøvrering i forhold til kW forbruget ved kaj giver større energiforbrugs- og emissionsandele end timeandele for manøvrering. For Skagen Havn i 2019 er de beregnede manøvreringsandele for tidsforbrug, energiforbrug (GJ), CO_2-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner hhv. 5%, 9%, 9%, 9% og 9%.

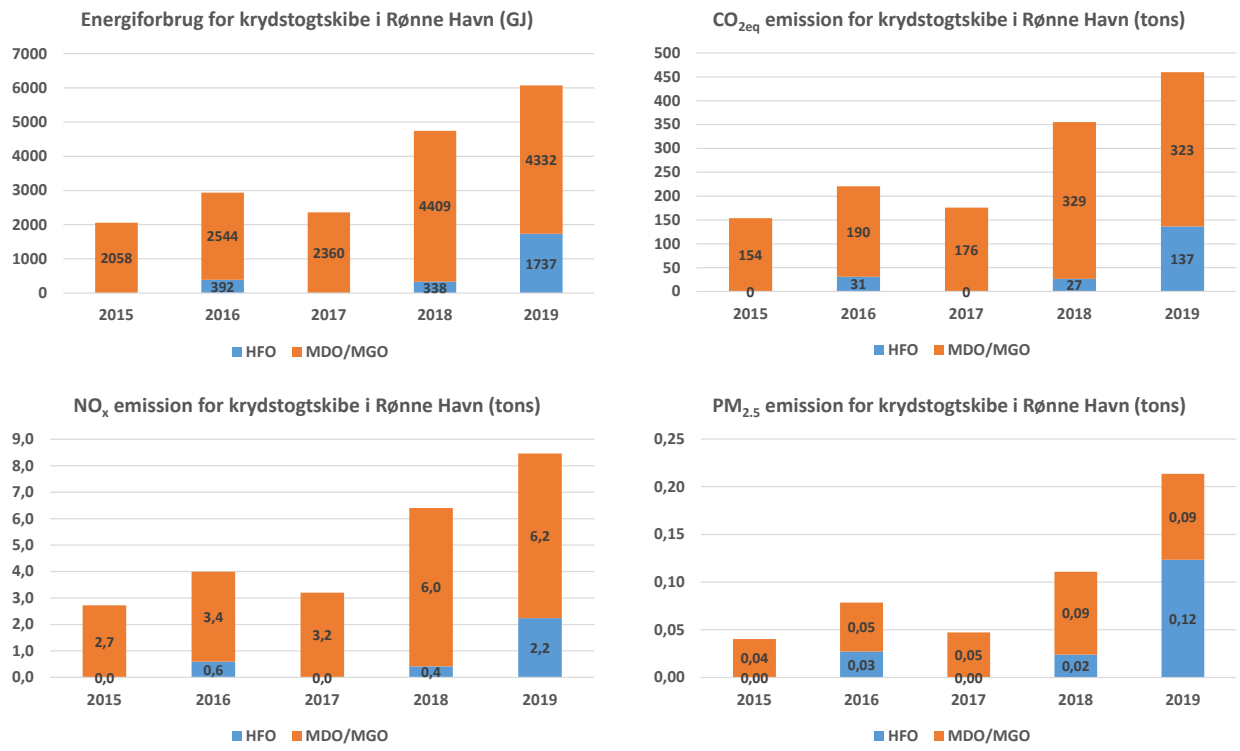
4.4.5 Rønne Havn

Tabel 4.7 viser antallet af anløb med krydstogtskibe i Rønne Havn i 2019 og det beregnede energiforbrug og emissioner fordelt på aktivitet (manøvrering/ved kaj) og brændstoftype (HFO og MDO/MGO). I bilag 4 vises tilsvarende resultater for 2015-2018.

Figur 4.16 viser de samlede energiforbrug og CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner i Rønne Havn i perioden 2015-2019 totalt og fordelt på brændstoftyper.

Tabel 4.7. Antal anløb af krydstogtskibe i Rønne Havn i 2019 og det beregnede energiforbrug og emissioner fordelt på aktivitet (manøvrering/ved kaj) og brændstoftype (HFO, MDO/MGO).

Aktivitet	Skibstype	Brændstoftype	Anløb	Tid	MWh	Brændstofforbrug		NO_x	$PM_{2,5}$	CO_2	CH_4	N_2O	CO_{2eq}
			Antal	Timer	MWh	tons	GJ	kg	kg	tons	kg	kg	tons
Manøvr.	Krydstogtskibe	HFO	5	3	19,3	4,1	166	191	11	13	0,3	0,3	13
Manøvr.	Krydstogtskibe	MDO/MGO	39	28	56,1	12,6	536	684	10	40	0,8	1,0	40
Manøvr.	Total		44	31	75,3	16,6	703	875	21	53	1	1	53
Ved kaj	Krydstogtskibe	HFO	5	49	205,8	38,4	1571	2049	113	123	3,1	3,1	124
Ved kaj	Krydstogtskibe	MDO/MGO	39	361	450,8	88,9	3796	5542	80	281	6,8	7,1	283
Ved kaj	Total		44	410	656,7	127,3	5367	7591	193	403	10	10	407
Samlet	Krydstogtskibe	HFO	5	52	225,1	42,5	1737	2240	123	135	3,4	3,4	137
Samlet	Krydstogtskibe	MDO/MGO	39	389	506,9	101,5	4332	6226	90	321	7,6	8,1	323
Samlet	Grand total		44	441	732,0	143,9	6069	8466	213	456	11	12	460



Figur 4.16. Energiforbrug (GJ) og CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner fra krydstogtskibe i Rønne Havn for 2015-2019 fordelt på brændstoftyper.

For al aktivitet med krydstogtskibe i Rønne Havn beregnes samlet set de største energiforbrug og emissioner i 2019.

Udviklingen i CO_{2eq}-emissionerne følger udviklingen i energiforbruget. De totale CO_{2eq}-emissioner stiger med 199% fra 2015 til 2019.

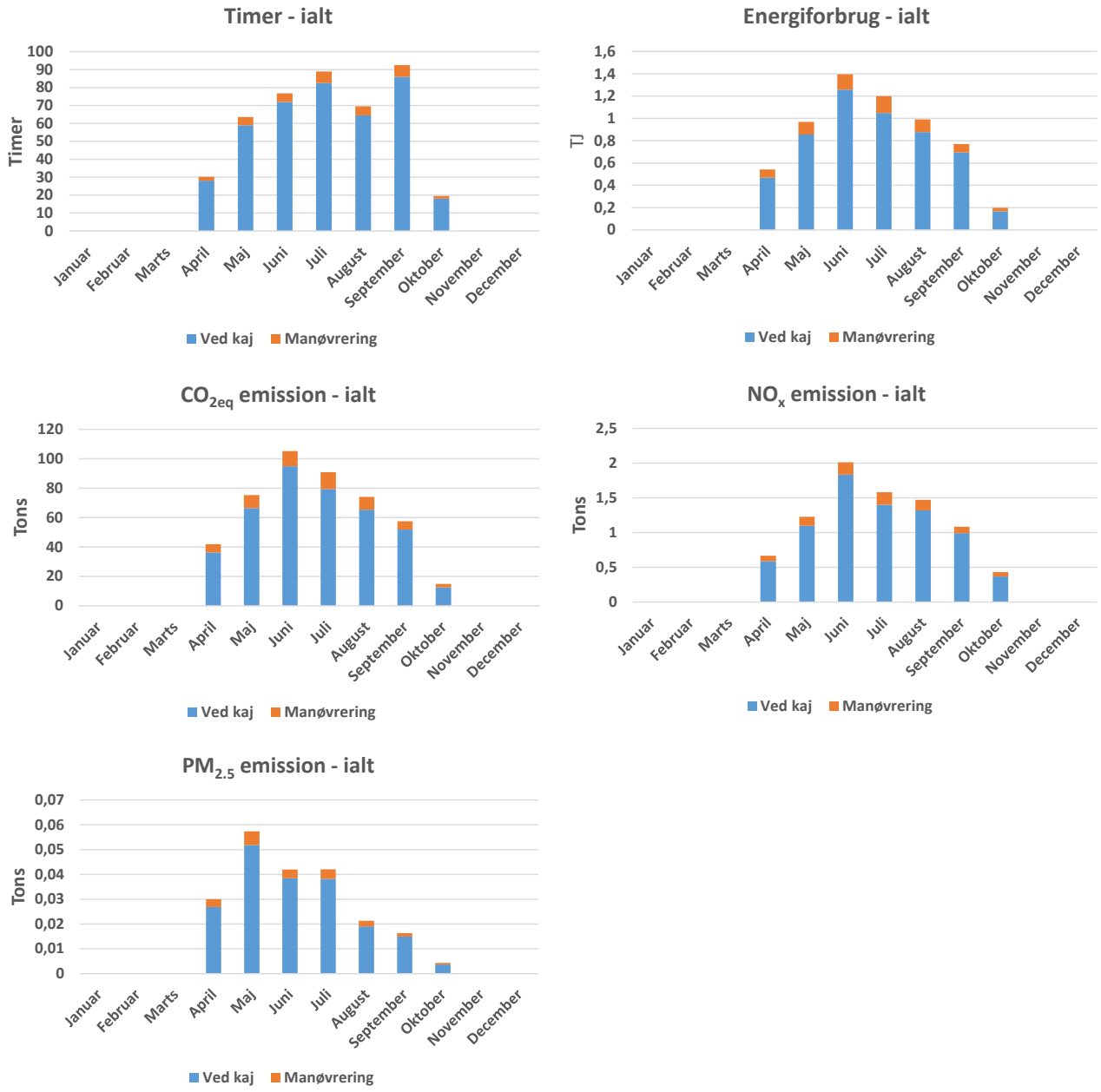
De samlede NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner stiger med hhv. 210% og 428% fra 2015 til 2019.

Årsagen til den kraftige $PM_{2,5}$-emissionsstigning fra 2015 til 2019 i Rønne Havn skyldes, at ingen HFO-forbrugende krydstogtskibe med scrubber ombord anløb havnen i 2015; i 2019 var der fem anløb med denne type krydstogtskibe. Som før nævnt, er $PM_{2,5}$-emissionsfaktorerne for skibe, der bruger HFO med scrubber, omtrent tre gange så store som $PM_{2,5}$-emissionsfaktorerne for skibe, der bruger MDO/MGO.

I 2019 udgør HFO-andelene 29% af det samlede energiforbrug og hhv. 30%, 26% og 58% af de samlede CO_2-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner.

Timer, energiforbrug og emissioner fordelt pr. måned og aktivitet

Figur 4.17 viser i alt antal timer og de beregnede energiforbrug, NO_x-, $PM_{2,5}$- og CO_{2eq}-emissioner i Rønne Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).



Figur 4.17. Antal timer i alt og emissioner for krydstogtskibe i Rønne Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).

Udviklingen i timeantal for krydstogtskibene i Rønne Havn er ikke helt proportional med udviklingen i energiforbrug, CO_{2eq}- og NO_x-emissioner, fordi skibene, der anløb havnen i april og juni, var de største, og skibene, der anløb havnen i september, var de mindste, taget som månedsgennemsnit.

Særlig høje $PM_{2,5}$-emissioner beregnes for maj måned, hvor to af de fem anløb med HFO-forbrugende krydstogtskibe udrustet med scrubber finder sted.

Det større kW forbrug for krydstogtskibe ved manøvrering i forhold til kW forbruget ved kaj giver større energiforbrugs- og emissionsandele end timeandele for manøvrering. For Rønne Havn i 2019 er de beregnede manøvreringsandele for tidsforbrug, energiforbrug (GJ), CO_{2eq}-, NO_x- og $PM_{2,5}$-emissioner hhv. 7%, 12%, 12%, 10% og 10%.

4.5 Energiforbrugsrater og emissionsrater for NO_x og $PM_{2,5}$

Energiforbrugsrater og emissionsrater for NO_x og $PM_{2,5}$ for alle skibene i undersøgelsen er vist i Bilag 5.

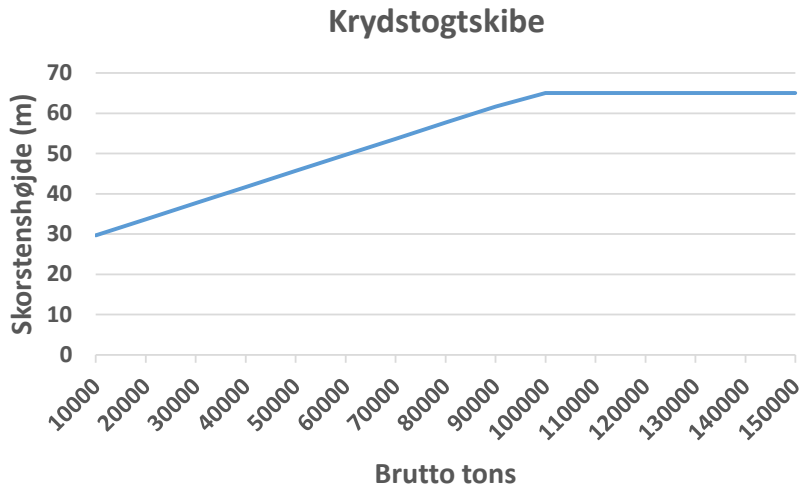
4.6 Fysiske parametre

Af hensyn til de efterfølgende spredningsberegninger skal skorstenshøjden (højde fra vandlinje til toppen af skorstenen) og overbygningshøjden (højde fra vandlinje til toppen af skibets overbygning) kendes for de enkelte skibe i undersøgelsen. For krydstogtskibe bruges data fra Olesen & Berkowicz (2005), hvor relationen mellem BT og skorstenshøjde er fastlagt for krydstogtskibene i Københavns Havn. I årene efter førnævnte undersøgelse er krydstogtskibene gradvist blevet større, og derfor antages i nærværende projekt en maksimal skorstenshøjde på 65 meter, svarende til passagehøjden for skibe, der passerer under Storebæltsbroen:

$$H = 0,0004 \cdot BT + 25,688 \text{ , H<= 65 m} \quad (6)$$

Hvor H=skorstenshøjde (m) og BT= skibets bruttoton. Figur 4.18 viser skorstenshøjden som funktion af BT for krydstogtskibene, der benyttes i dette projekt.

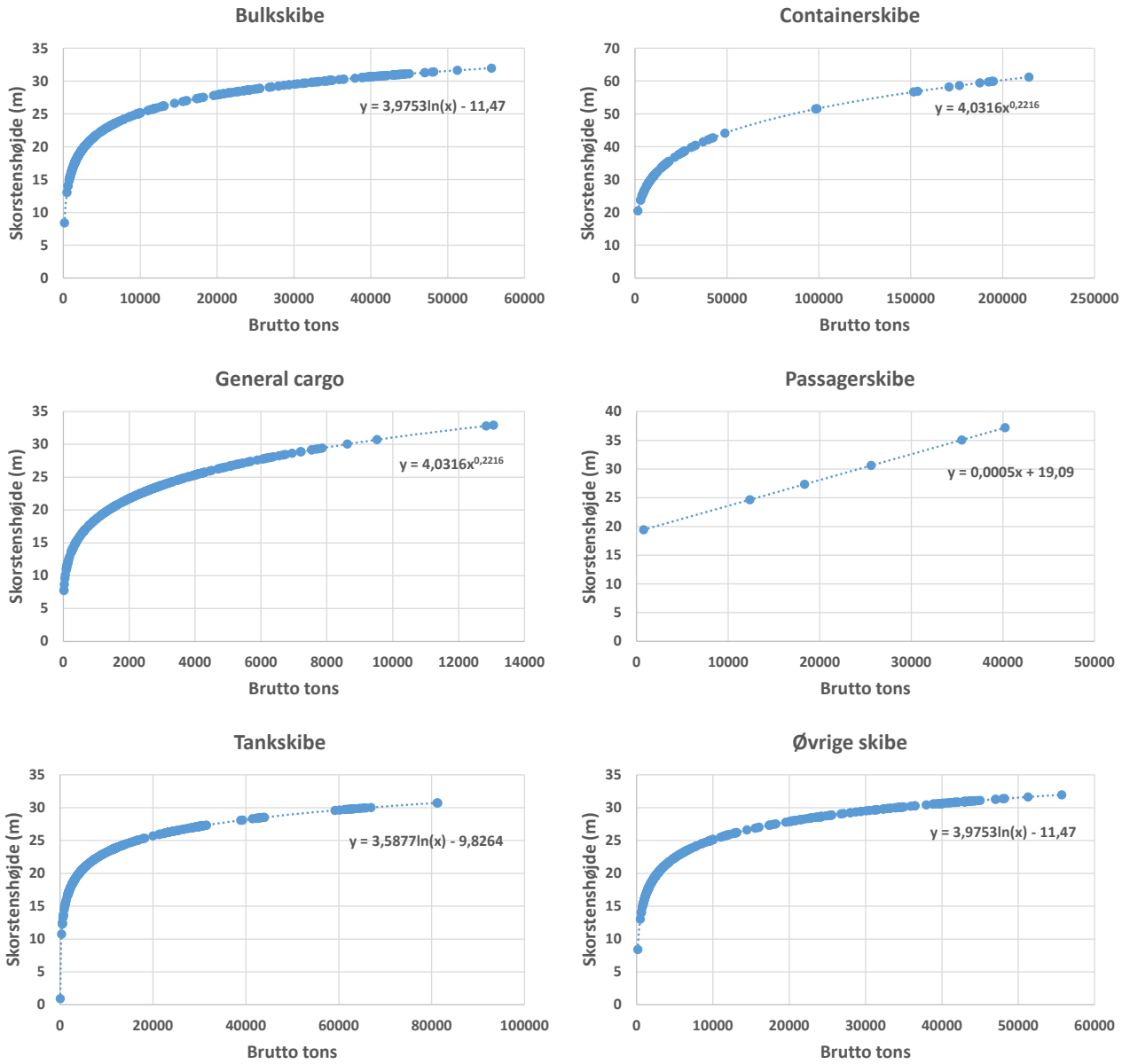
En nærmere analyse af data for skorstens- og overbygningshøjder fra Olesen & Berkowicz (2005) viser, at overbygningshøjden for krydstogtskibene med god tilnærmelse kan sættes til 67% af skorstenshøjden, og denne procentværdi er derfor anvendt ved beregning af overbygningshøjden for krydstogtskibene i dette projekt.



Figur 4.18. Estimeret skorstenshøjde (m) som funktion af BT for krydstogtskibene i undersøgelsen.

Skorstenshøjderne som funktion af bruttotons for bulk-, container-, general cargo, passager- og tankskibe vist på Figur 4.19 er beregnet ved hjælp af regressionsligningerne vist på figuren. Regressionsligningerne er afledt af data fra SHIP-DESMO - modellen (f.eks. Kristensen, 2017). Punkterne på figurerne repræsenterer skorstenshøjderne for de faktiske skibe i undersøgelsen beregnet vha. af regressionsligningerne.

For øvrige skibe, slæbebåde, ro- ro cargo m.m. benyttes sammenhængen mellem skorstenshøjder og bruttotons for bulkskibe.



Figur 4.19. Skorstenshøjde som funktion af bruttotons for andre skibstyper end krydstogtskibe i undersøgelsen.

Røggasmængden i $m^3(n,f)/kg$ brændstof beregnes separat for HFO og MGO/MDO ved anvendelse af funktioner opstillet af Olesen & Berkowicz (2015) på basis af Luftvejledningen (Miljøstyrelsen, 2001). Ved at kombinere med det beregnede brændstofforbrug for hvert enkelt skib kan volumenstrømmen af røggassen ($m^3(n,f)/s$) i hvert tilfælde beregnes.

Data for skibene ses i Bilag 5 med oplysninger om skibets navn, BT, IMO kode, motorbyggeår, brændstoftype, samlet installeret motoreffekt (kW), effektbehov ved kaj (kW), skorstenshøjde, bygningshøjde og røggastemperatur, -hastighed og -volumenstrøm. Røggashastigheden er i alle tilfælde 27,5 m/s, hvorved skorstensdiametre er uden praktisk betydning.

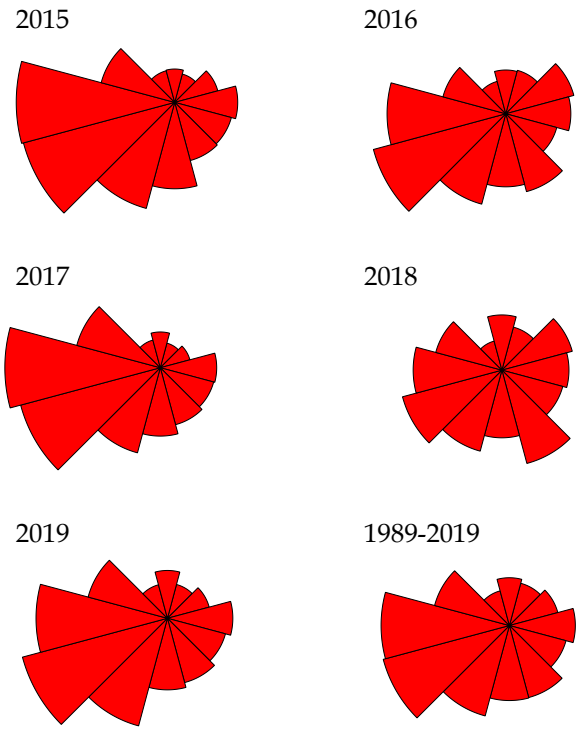
5. Påvirkning af luftkvaliteten i de fem havne

Dette kapitel belyser, hvordan emissioner fra skibe påvirker luftkvaliteten i og omkring havnene i København, Aarhus, Aalborg, Skagen og Rønne. Luftkvaliteten er beregnet med OML-modellen i et gitternet af beregningspunkter, som er defineret rundt om havnene (se kapitel 3). Koncentrationsberegninger er gennemført ved jordoverfladen (1,5 m) og for forskellige højder (25 m, 50 m og 70 m). For NO_2 er vist koncentrationer for årsmiddelværdier og for spidsværdier i form af den 19. største timeværdi. Der er regnet med bidrag fra skibene og baggrundskoncentrationen, idet kemiske reaktioner er styret af den samlede koncentration. For $PM_{2,5}$ er det udelukkende bidraget af primære (direkte emitterede) partikler fra skibe, som er beregnet, idet der ikke indgår kemi i beregningerne.

For København og Aarhus er anvendt emissioner fra krydstogtskibe og andre skibe, og der er udført tre typer beregninger med emission fra: (1) alle krydstogtskibe og andre skibe, (2) kun krydstogtskibe eller (3) kun andre skibe. For Aalborg, Skagen og Rønne er alene anvendt emissioner for krydstogtskibe.

5.1 Beregningsår

Der er udført spredningsberegninger for et repræsentativt meteorologisk år blandt de fem år med emissionsopgørelser. Året er valgt på baggrund af en analyse af vindretninger. For året 2019 stemmer vindretningerne bedst overens med de gennemsnitlige 'klimatiske' vindretninger for perioden 1989-2019, som det fremgår af vindroserne i Figur 5.1. Vindretningerne er fra den meteorologisk vejrmodel WRF for København. Det vurderes, at 2019 også er mest repræsentativt for de øvrige byer.



Figur 5.1. Vindroser for årene 2015 til 2019 samt for perioden 1989 til 2019. Nord er opad.

5.2 Oversigt over påvirkning af luftkvaliteten i de fem havne

Resultatet af alle beregningerne er vist for alle havne i tabelform med de maksimale værdier, som optræder i hele beregningsnettet. Koncentrationerne er vist i Tabel 5.1 sammen med havnenes baggrundsniveauer, og i Tabel 5.2 er det kun bidragene fra skibene. Generelt er det vanskeligt i detaljer at sammenligne og vurdere niveauerne for enkelte punkter, idet koncentrationen er meget afhængig af afstanden mellem kilden og beregningspunktet i det anvendte gitternet. Derfor skal værdierne også vurderes i forhold til den geografiske udbredelse, som er vist på kort for udvalgte højder og er præsenteret i de efterfølgende fem afsnit.

Tabel 5.1 viser, at i jordniveau er der ingen overskridelse af grænseværdierne for hverken årsmiddelværdien for $PM_{2,5}$ på 25 µg/m^3, årsmiddelværdien for NO_2 på 40 µg/m^3 eller den 19. største timeværdi for NO_2 på 200 µg/m^3. For årsmiddelværdien af NO_2 er der en mindre overskridelse af grænseværdien i 25 m i Aarhus. For den 19. største timeværdi af NO_2 er der betydelige overskridelser af grænseværdien i København for højderne 25-70 m, i Aarhus for højderne 50-70 m, i Aalborg i 50 m og i Skagen for højderne 50-70 m. De største koncentrationer for NO_2 i Aarhus i 25 m skyldes, at beregningspunktet kun ligger 16 m fra en kajplads. I Rønne er der ingen overskridelse. Der er ingen overskridelser af grænseværdien for $PM_{2,5}$ i nogen højder i nogen af havnene.

I Københavns Havn bidrager især andre skibe til den maksimale NO_2-koncentration som årsmiddel ved jordoverfladen og i 25 m, mens krydstogtskibene især bidrager i 50 m og 70 m højde. I Aarhus Havn er det især andre skibe, som bidrager i alle højder til årsmiddel af NO_2. Næsten sammen tendens ses for den 19. højeste timeværdi af NO_2.

Tabel 5.1. Maksimale koncentrationsværdier (µg/m^3) i et beregningspunkt i havnen i 2019, kildebidrag plus baggrund. Understreget værdier er en overskridelse af grænseværdien.

		Alle skibe				**Kun krydstogtskibe**				**Kun andre skibe**			
		1,5 m	**25 m**	**50 m**	**70 m**	**1,5 m**	**25 m**	**50 m**	**70 m**	**1,5 m**	**25 m**	**50 m**	**70 m**
Baggrund							*NO_2, årsmiddel (µg/m^3)*						
København	12,1	15,7	23,8	22,1	18,9	13,2	16,1	21,0	17,9	15,3	23,7	16,3	14,2
Aarhus	11,5	18,6	41,8	20,8	21,8	11,7	12,2	13,2	13,1	18,6	41,7	20,8	21,7
Aalborg	10,3					10,5	10,8	11,4	10,7				
Skagen	7,5					7,7	8,6	11,2	10,7				
Rønne	8,4					8,7	9,3	9,2	8,8				
							19. største NO_2 (µg/m^3)						
København	55	122	935	629	583	89	238	629	583	122	935	346	193
Aarhus	58	177	1780	718	891	77	142	403	361	177	1780	718	891
Aalborg	64					69	134	237	97				
Skagen	52					57	159	551	517				
Rønne	41					56	123	128	76				
							$PM_{2,5}$, årsmiddel (µg/m^3)						
København	11,5	11,7	12,5	13,2	12,6	11,6	12,1	13,0	12,6	11,7	12,5	12,0	11,6
Aarhus	9,8	10,2	12,6	10,3	10,4	9,8	9,9	10,1	10,1	10,2	12,6	10,3	10,4
Aalborg	10,0					10,0	10,1	10,3	10,1				
Skagen	6,0					6,0	6,2	6,7	6,8				
Rønne	8,0					8,0	8,1	8,1	8,0				

Tabel 5.2. Bidrag til maksimale koncentrationsværdier (µg/m³) i et beregningspunkt i havnen i 2019, intet baggrundsbidrag.

		Alle skibe				Kun krydstogtskibe				Kun andre skibe			
		1,5 m	25 m	50 m	70 m	1,5 m	25 m	50 m	70 m	1,5 m	25 m	50 m	70 m
	Baggrund						*NO_2, årsmiddel (µg/m³)*						
København	12,1	3,6	11,7	10	6,8	1,1	4	8,9	5,8	3,2	11,6	4,2	2,1
Aarhus	11,5	7,1	30,3	9,3	10,3	0,2	0,7	1,7	1,6	7,1	30,2	9,3	10,2
Aalborg	10,3					0,2	0,5	1,1	0,4				
Skagen	7,5					0,2	1,1	3,7	3,2				
Rønne	8,4					0,3	0,9	0,8	0,4				
							19. største NO_2 (µg/m³)						
København	55	67	880	574	528	34	183	574	528	67	880	291	138
Aarhus	58	119	1722	660	833	19	84	345	303	119	1722	660	833
Aalborg	64					5	70	173	33				
Skagen	52					5	107	499	465				
Rønne	41					15	82	87	35				
							$PM_{2,5}$, årsmiddel (µg/m³)						
København	11,5	0,22	0,97	1,7	1,1	0,10	0,56	1,52	1,07	0,20	0,96	0,48	0,13
Aarhus	9,8	0,43	2,8	0,54	0,63	0,02	0,08	0,28	0,28	0,43	2,8	0,54	0,62
Aalborg	10,0					0,02	0,12	0,33	0,12				
Skagen	6,0					0,02	0,18	0,68	0,78				
Rønne	8,0					0,02	0,07	0,11	0,04				

Sammenligning med WHO's retningslinjer for luftkvalitet

EU's grænseværdier er gældende lovgivning i Danmark via implementering i danske bekendtgørelser. Verdenssundhedsorganisation (WHO) har ligeledes fremsat nogle retningslinjer for luftkvalitet (air quality guidelines), men disse retningslinjer er ikke juridisk bindende (WHO, 2006). WHO's retningslinjer er halvdelen af EU's grænseværdi for årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$ (EU's er 25 µg/m³, mens WHO's er 10 µg/m³), mens de er ens for årsmiddelværdien for NO_2 (40 µg/m³). For spidsværdier for NO_2 er EU's grænseværdi 200 µg/m³ for den 19. højeste timeværdi over et år, mens WHO's retningslinje også er 200 µg/m³, men uden fastsættelse af et antal timer. WHO's retningslinje er derfor, at alle timeniveauer over 200 µg/m³ skal undgås. Det er således en skærpet retningslinje i forhold til EU grænseværdien.

Som det fremgår af Tabel 5.1 overskrides WHO's retningslinje for årsmiddelværdien af NO_2 ikke, mens retningslinjen for spidværdier for NO_2 overskrides. WHO's retningslinje for årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$ overskrides i baggrundsluften i København og Aalborg i 2019, og dermed også i Københavns Havn og Aalborg Havn, hvor skibene giver et ekstra mindre bidrag.

Københavns Kommune tilslutter sig WHO retningslinjer for luftkvalitet

Københavns Kommune har i forbindelse med C40 møde i København i oktober 2019 tilsluttet sig C40 byernes erklæring om ren luft (Københavns Kommune, 2019). C40 organiserer 94 af verdens klimavenlige storbyer med et samlet indbyggertal på omkring 700 millioner mennesker.

Tilslutningen til erklæringen indebærer blandt andet, at Københavns Kommune har påtaget sig at arbejde for, at luftkvaliteten i kommunen kommer på

et niveau, som overholder FN's verdenssundhedsorganisation WHO's retningslinjer for god luftkvalitet.

Derudover indeholder erklæringen følgende hensigtserklæringer:

- Københavns Kommune udarbejder inden for to år en baseline og opsætter mål for reduktion af luftforurening, som på sigt kan medvirke til, at WHO´s retningslinjer for luftens indhold af stoffer kan overholdes.
- Københavns Kommune udarbejder inden 2025 en plan for, hvordan WHO´s vejledende grænseværdier kan overholdes og igangsætter indsatser, som betydeligt reducerer forureningen fra de største forureningskilder i byen.

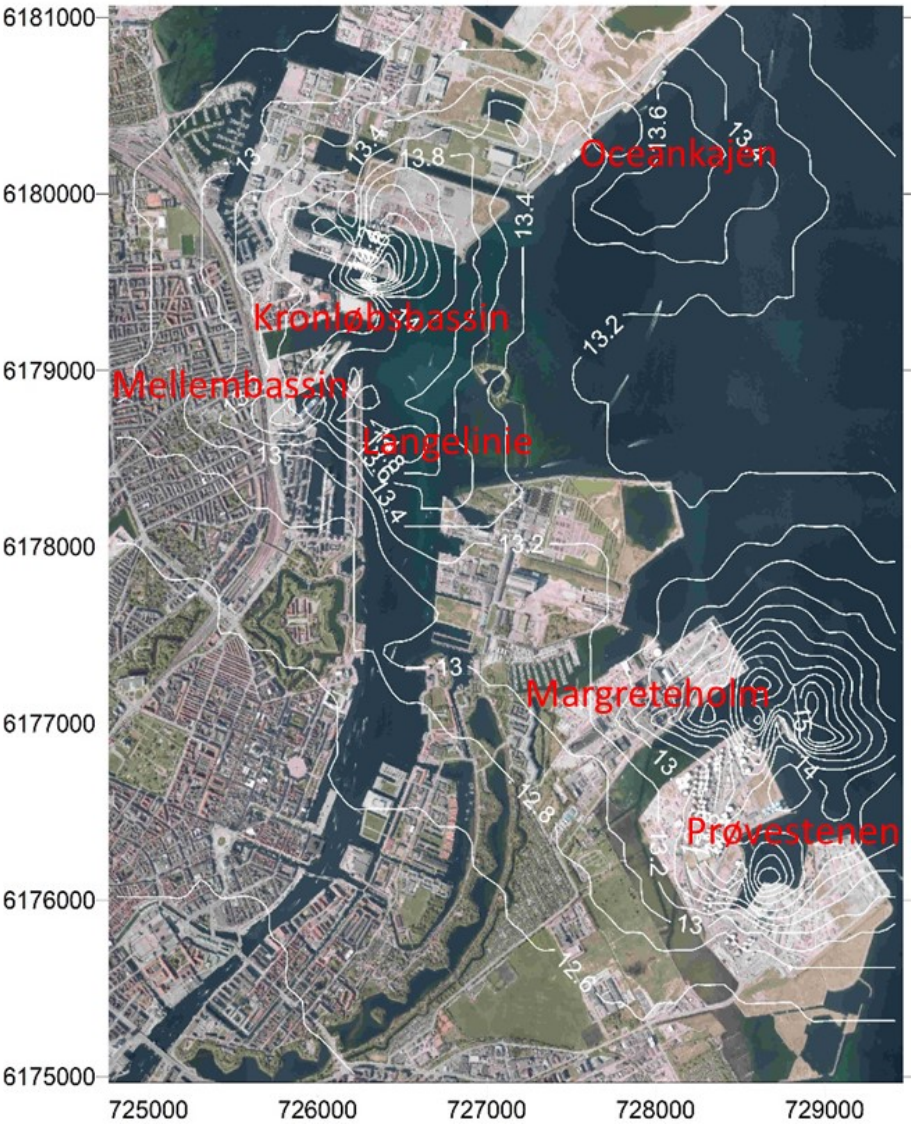
Københavns Kommune har endnu et besluttet, hvilket årstal, som WHO's retningslinjer skal være opfyldt.

5.3 Københavns Havn

Årsmiddelkoncentration af NO_2 ved jordoverfladen

Beregningerne er gennemført for 2019 med oplysninger om anløb af krydstogtskibe, emissioner, baggrundsforurening og meteorologi for samme år. Baggrundsforureningen er baseret på målinger fra H.C. Ørsted Instituttet i København, og de få tilfælde, hvor der mangler målinger, er der suppleret med modelberegninger fra overvågningsprogrammet (Ellermann et al., 2020a).

Årsmiddelkoncentrationen ved jorden (1,5 m) er visualiseret i Figur 5.2 og består af summen af baggrundskoncentrationen og bidraget fra krydstogtskibe og andre skibe. Luftkvaliteten er illustreret med iso-linjer, dvs. kurver, hvor koncentrationsniveauet er det samme.



Figur 5.2. Modelleret årsmiddelkoncentration (µg/m^3) for NO_2 i 1,5 m for København i 2019. Bidrag fra alle skibe, samt baggrundskoncentrationen.

I 2019 er den højeste NO_2-årsmiddelkoncentration på 15,7 µg/m^3, som optræder ved Kronløbsbassinet nord for Langelinie. Her er der høje bygninger tæt på kajen, som begrænser spredningen, og leder til at niveauerne dermed bliver høje. Andre lokale maksima ses umiddelbart øst for Langeliniekajen med 14,0 µg/m^3, ved Oceankajen 13,8 µg/m^3 og ved Prøvestenen 15,4 µg/m^3. Til sammenligning er baggrundskoncentrationen 12,1 µg/m^3.

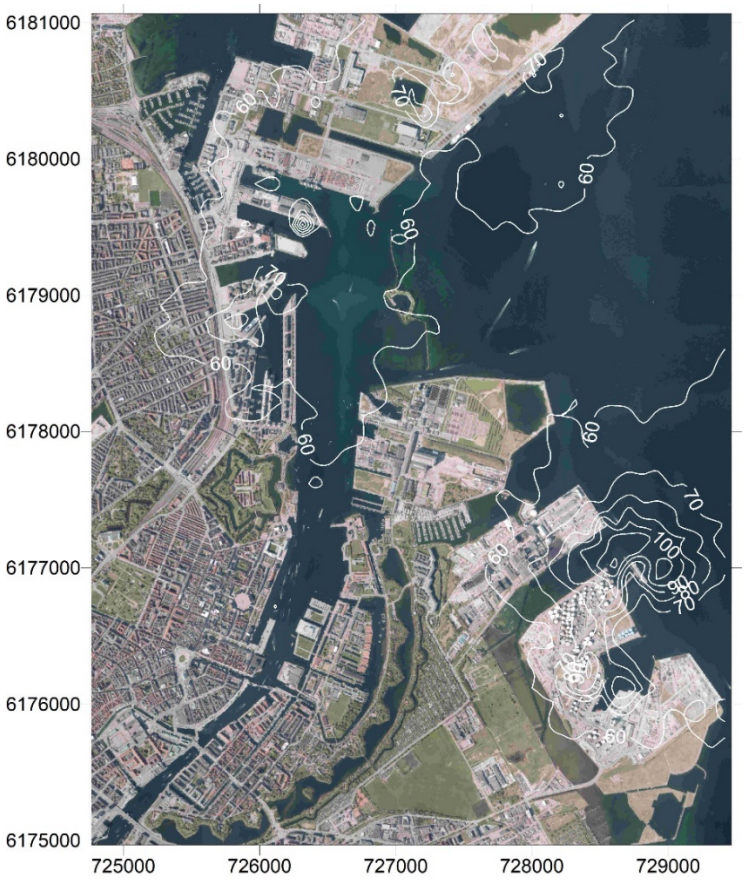
Det er forventeligt, at de højeste koncentrationer ofte optræder øst for emissionskilderne pga. en dominerende vestlig vind. Laveste koncentration er 12,3 µg/m^3 i det sydvestlige hjørne af kortet. Koncentrationerne er langt under grænseværdien på 40 µg/m^3.

19. højeste timeværdi af NO_2 ved jordoverfladen

Den 19. højeste timeværdi af NO_2 ved jorden ved emission fra alle skibe er vist i Figur 5.3. Værdien er en spidsværdi, som er meget følsom over for meteorologi og baggrundskoncentration. Fx vil blot 19 timer med ugunstige forhold give forhøjede koncentrationer. Til eksempel vil en sydøstlig vindretning, som transporterer forhøjede baggrundskoncentrationer fra Centraleuropa til København, være nok til at bestemme den 19. højeste timeværdi. Både

dens værdi og geografiske placering kan derfor forventes at variere fra år til år.

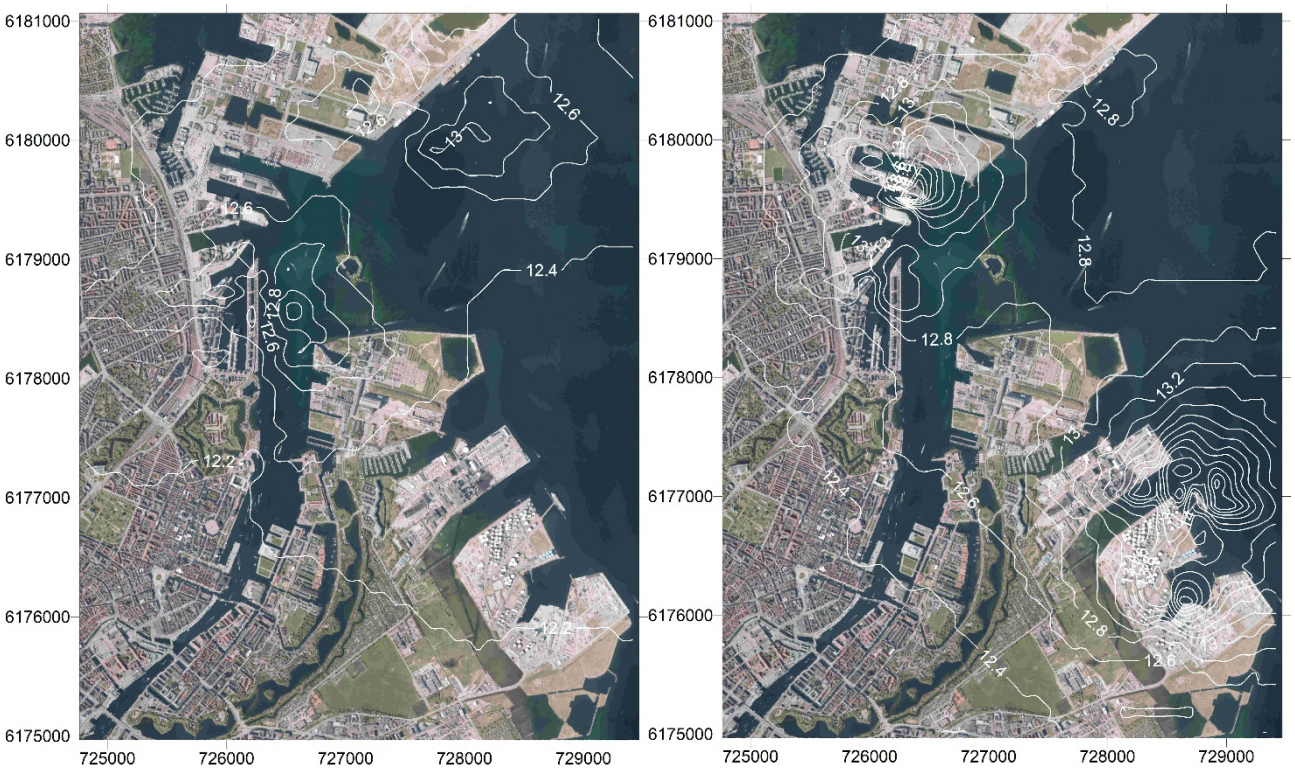
I 2019 optræder de højeste spidsværdier ved Prøvestenen og i Kronløbsbassinet, begge på 122 µg/m³, hvilket er under grænseværdien på 200 µg/m³. I Mellembassinet ved Langelinie og ved Oceankaj er niveauerne ca. 70-80 µg/m³. Den laveste spidsværdi er 57 µg/m³ i det sydvestlige hjørne, hvilket er nær baggrundsmålingerne på 56 µg/m³. Til sammenligning var den 19. højeste værdi på H.C. Andersens Boulevard 102 µg/m³ og 88 µg/m³ på Jagtvej i 2019 (Ellermann et al., 2020a).



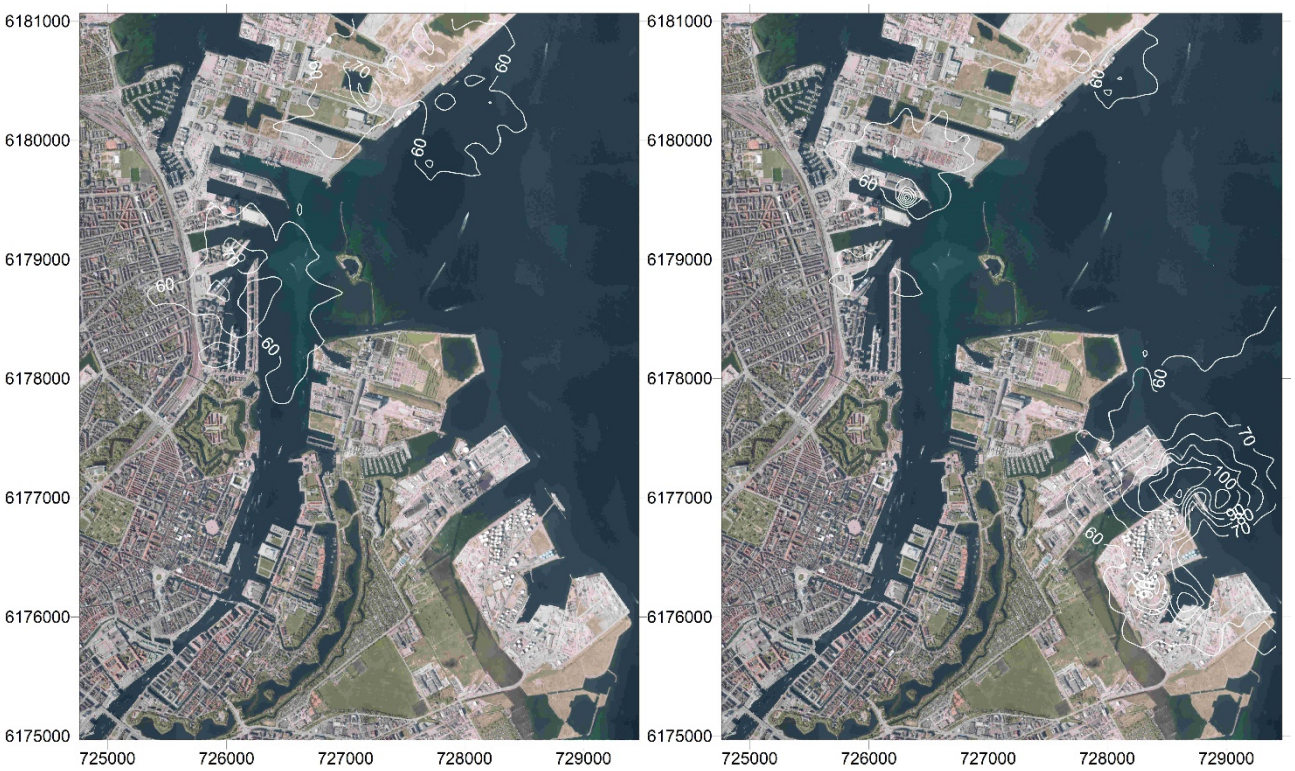
Figur 5.3. Modelleret 19. højeste timeværdi (µg/m³) for NO_2 i 1,5 m for København i 2019. Bidrag fra alle skibe, samt baggrundskoncentrationen.

Krydstogtskibenes og andre skibes NO_2-bidrag ved jordoverfladen

I Figur 5.4 er vist årsmiddelkoncentrationen af NO_2 for emissioner alene fra krydstogtskibene respektive andre skibe begge inklusive baggrundskoncentrationer. For krydstogtskibene optræder de største værdier øst for Langelinie og Oceankaj med maksimum på 13,2 µg/m³. For andre skibe er det ved Prøvestenen, der er de højeste værdier med 15,3 µg/m³ samt ved Kronløbsbassinet begge med maksimum på 15,0 µg/m³.



Figur 5.4. Årsmiddelkoncentration (µg/m^3) af NO_2 i 1,5 m i København for krydstogtskibe (venstre) og andre skibe (højre) (begge inkl. baggrundskoncentrationen).



Figur 5.5. Den 19. største timekoncentration (µg/m^3) af NO_2 i 1,5 m i København for krydstogtskibe (venstre) og andre skibe (højre) (begge inkl. baggrundskoncentrationen).

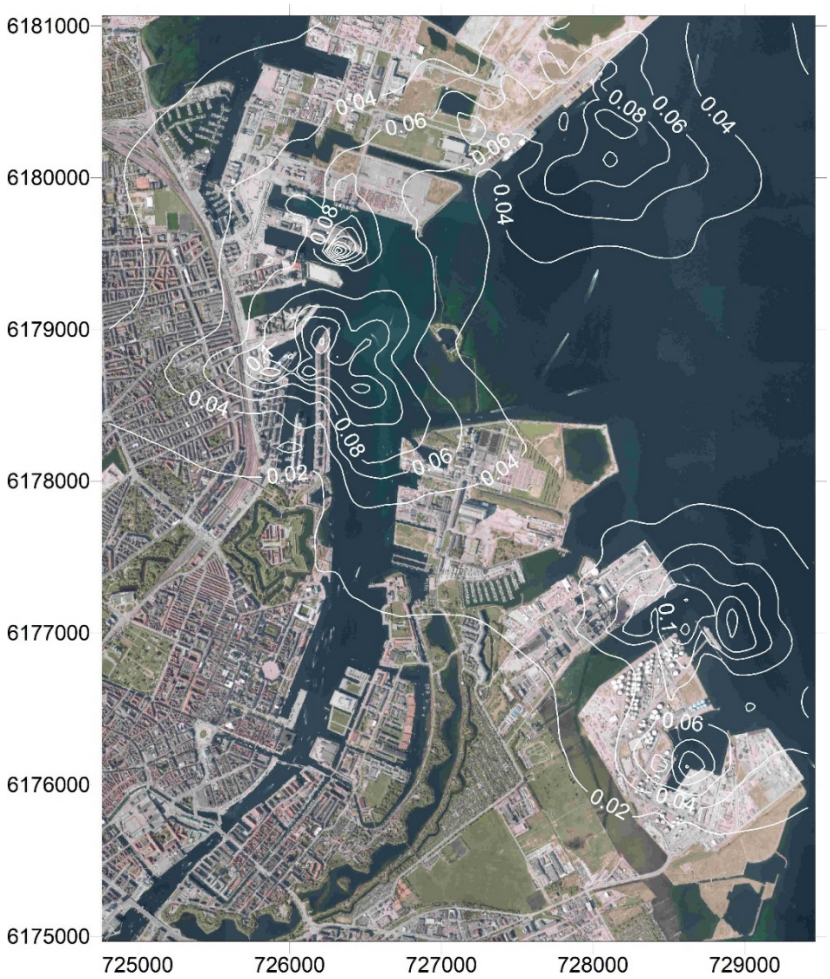
I Figur 5.5 er vist den 19. højeste timeværdi af NO_2 for emissioner alene fra krydstogtskibene respektive andre skibe begge inklusive baggrundskoncentrationer. For krydstogtskibene optræder de største værdier vest for Oceankaj med maksimum på 89 µg/m^3 og nordvest for Langelinie i Mellembassinet

med ca. 80 µg/m^3. For andre skibe er det ved Prøvestenen, der er de højeste værdier, samt ved Kronløbsbassinet, begge med maksimum på 122 µg/m^3.

Årsmiddelbidrag af $PM_{2,5}$ ved jordoverfladen

I Figur 5.6 er vist bidraget til årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$ for emissioner fra krydstogtskibene og andre skibe. Dette kan beregnes uden at inddrage baggrundsforureningen, idet der ikke indgår kemi i beregningerne på samme måde som NO_2, NO og O_3.

Det højeste koncentrationsbidrag af $PM_{2,5}$ er 0,22 µg/m^3, og optræder i Kronløbsbassinet. Andre lokale maksima er omkring Langeliniekajen (1,6 µg/m^3), øst for Oceankajen (1,0 µg/m^3), øst for Margreteholm (1,2 µg/m^3), i prøvestenshavnen (1,2 µg/m^3). I København er det maksimale lokale bidrag ca. 0,8 µg/m^3 og generelt under 0,2 µg/m^3. Ved sammenligning med grænseværdien skal koncentrationerne adderes med værdien på bybaggrundsstationen på H.C. Ørsted Instituttet, som er på 11,5 µg/m^3 for hele 2019. Maksima er således små i forhold til grænseværdien på 25 µg/m^3.

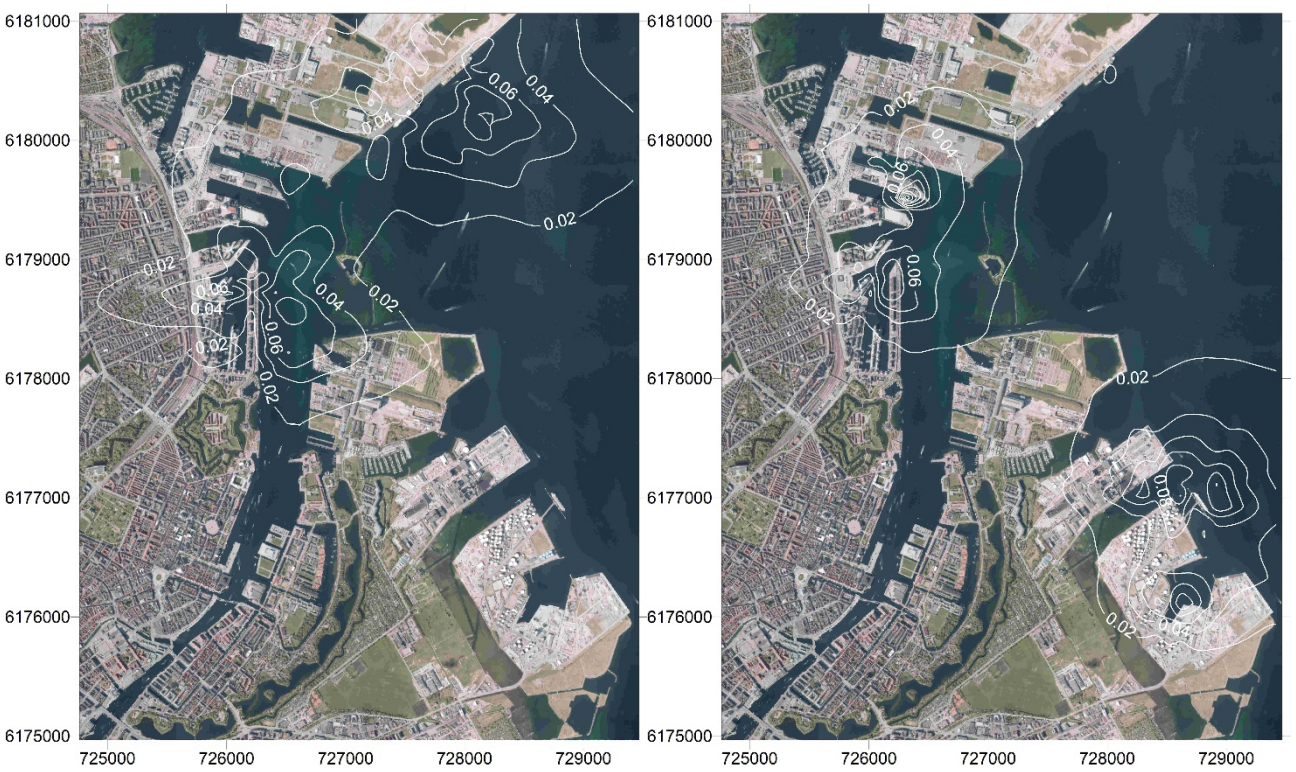


Figur 5.6. Bidrag til årsmiddelkoncentration (µg/m^3) af $PM_{2,5}$ i Københavns Havn i 1,5 m fra alle krydstogtskibe og andre skibe.

Krydstogtskibenes og andre skibes bidrag til årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$ ved jordoverfladen

I Figur 5.7 er vist bidraget til årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$ fra henholdsvis krydstogtskibene og andre skibe.

De højeste koncentrationsbidrag af $PM_{2,5}$ fra krydstogtskibe er 0,10 µg/m³, og optræder øst for Oceankajen. Omkring Langelinie er maksimum 0,08 µg/m³. For andre skibe optræder lokale maksima vest for Margreteholm (1,2 µg/m³), i prøvestenshavnen (1,0 µg/m³) og i Kronløbsbassinet (2,0 µg/m³). Andre skibe bidrager således mere til årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$ ved jordoverfladen end krydstogtskibe, som bl.a. hænger sammen med, at afkasthøjden er lavere for andre skibe i forhold til krydstogtskibe, hvilket giver mindre fortynding af emissionen før jordoverfladen rammes.



Figur 5.7. Bidrag til årsmiddelkoncentration (µg/m³) af $PM_{2,5}$ i Københavns Havn i 1,5 m for krydstogtskibe (venstre) og andre skibe (højre).

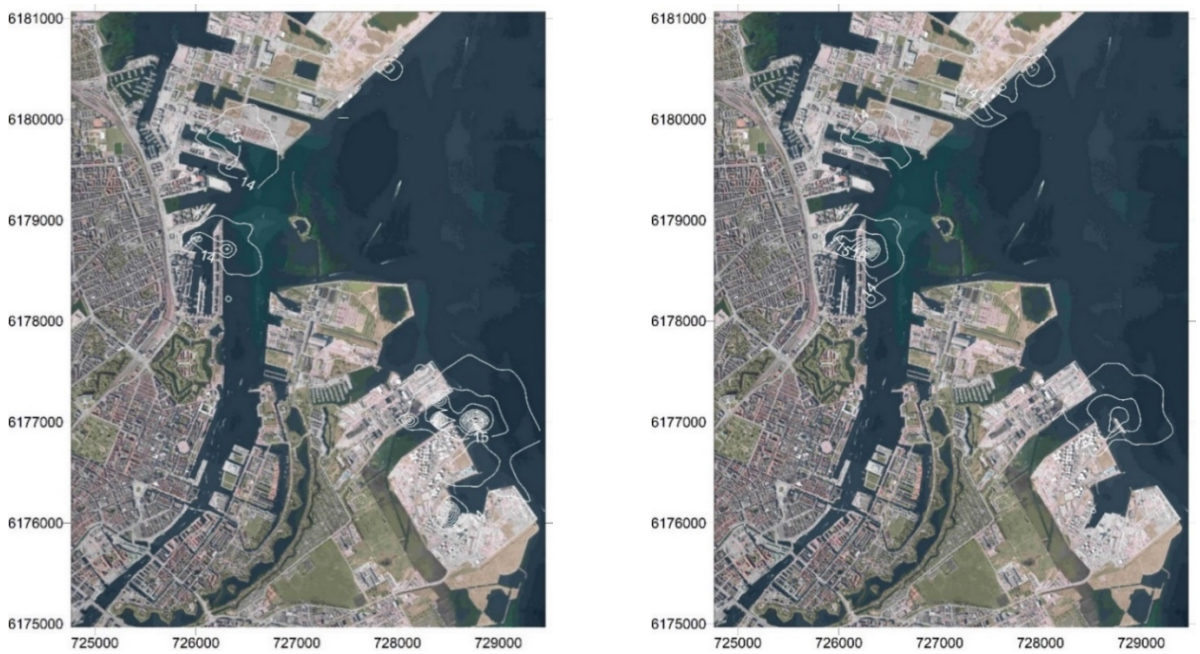
Koncentrationer af NO_2 i højder af 25-70 m

Af Tabel 5.1 fremgår det, at de største koncentrationer beregnes i højder på 25-50 m over jorden. Den geografiske udbredelse vises i det følgende for udvalgte højder.

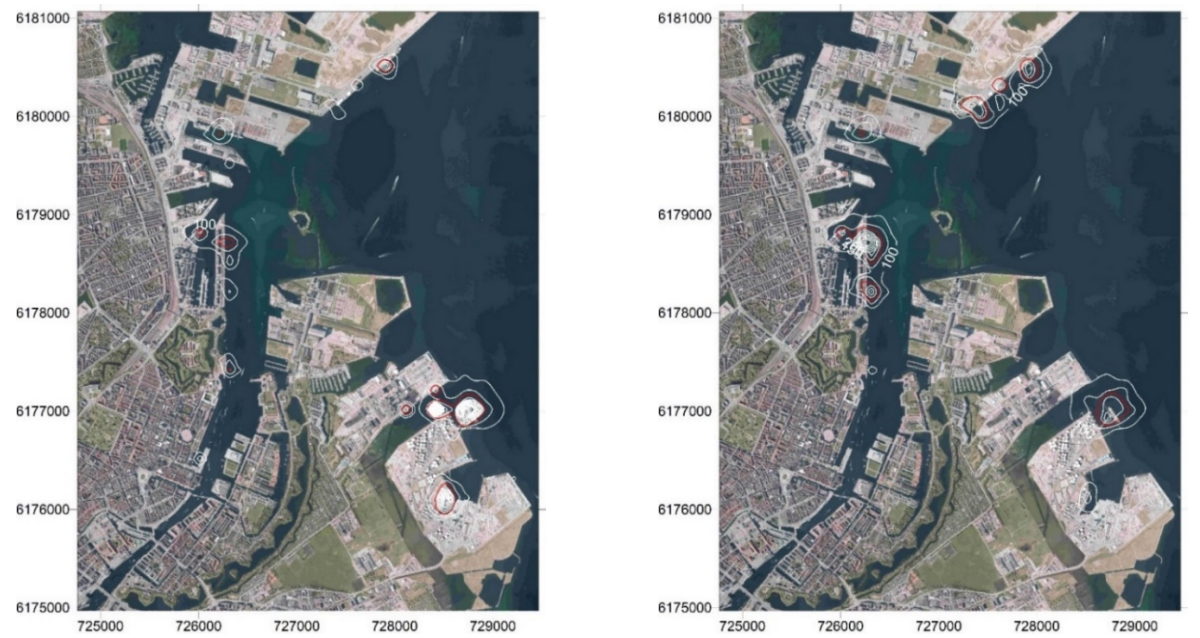
For årsmiddelværdien af NO_2 har højden 25 m den største koncentration og højden 50 m har den største udbredelse. De er begge vist i Figur 5.8. De maksimale årsmiddelværdier er henholdsvis 23,8 µg/m³ ved Prøvestenen, hvor det er andre skibe, som bidrager mest, og 22,1 µg/m³ ved Langelinie, hvor det er krydstogtskibe, som bidrager mest.

For den 19. største timekoncentration af NO_2 er grænseværdien på 200 overskredet i alle højderne. I højden 25 m beregnes den største koncentration og højden 50 m har den største udbredelse med overskridelse af grænseværdien.

Værdier for begge højder er vist i Figur 5.9. I højden 25 m er der overskridelser ved Prøvestenen, Langelinie og Oceankaj, og i 50 m ved Langelinie og Oceankaj samt et punkt i Kronløbsbassinet. Overskridelserne forekommer i nærområderne af kajpladserne, og i afstande op til 100-200 m fra kajpladserne. I højden 70 m (ikke vist) er der kun overskridelser af grænseværdien ved Langelinie og Oceankaj, her har udbredelsen samme omfang som i 50 m.

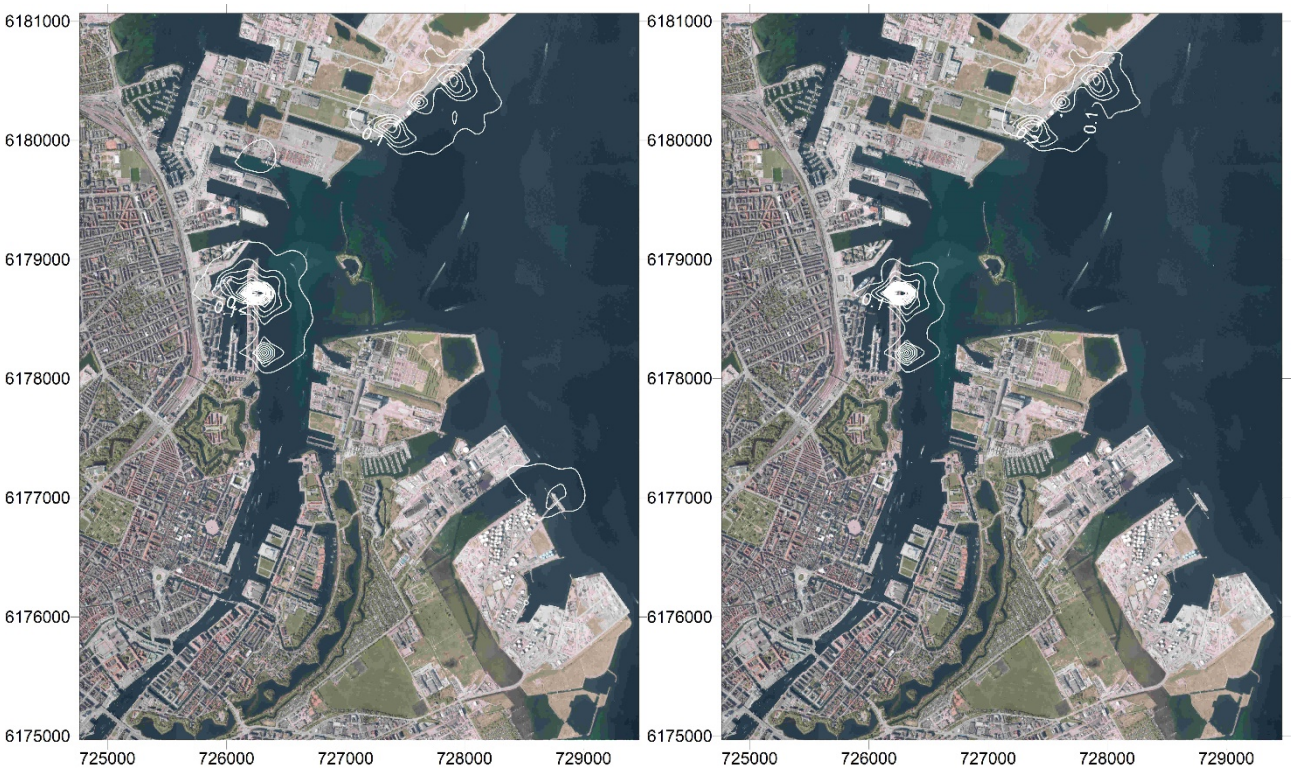


Figur 5.8. Modelleret årsmiddelkoncentration (µg/m^3) for NO_2 for Københavns Havn i 2019 for højderne 25 m (venstre) og 50 m(højre). Bidrag af alle skibe samt baggrundskoncentrationen.



Figur 5.9. Modelleret 19. højeste timeværdi (µg/m^3) for NO_2 for Københavns Havn i 2019 for højderne 25 m (venstre) og 50 m(højre). Bidrag af alle skibe samt baggrundskoncentrationen. Iso-koncentrationslinjer med 100 µg/m^3 interval, hvor grænseværdien 200 µg/m^3 er rød.

Årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$ har den største koncentration i højden 50 m på 1,7 µg/m³. Her er det krydstogtskibe, der bidrager mest. I Figur 5.10 er vist koncentrationerne for alle skibe og kun for krydstogtskibe. De maksimale årsmiddelværdier er henholdsvis 23,8 µg/m³ ved Prøvestenen, hvor det er andre skibe, som bidrager mest, og 22,1 µg/m³ ved Langelinie, hvor det er krydstogtskibe, som bidrager mest. Som det kan ses på figuren forekommer maksima inden for et lille område, og koncentrationen falder hurtigt omkring disse maksima.



Figur 5.10. Bidrag til årsmiddelkoncentration (µg/m³) af $PM_{2,5}$ i 50 m for alle skibe (venstre) og kun krydstogtskibe (højre).

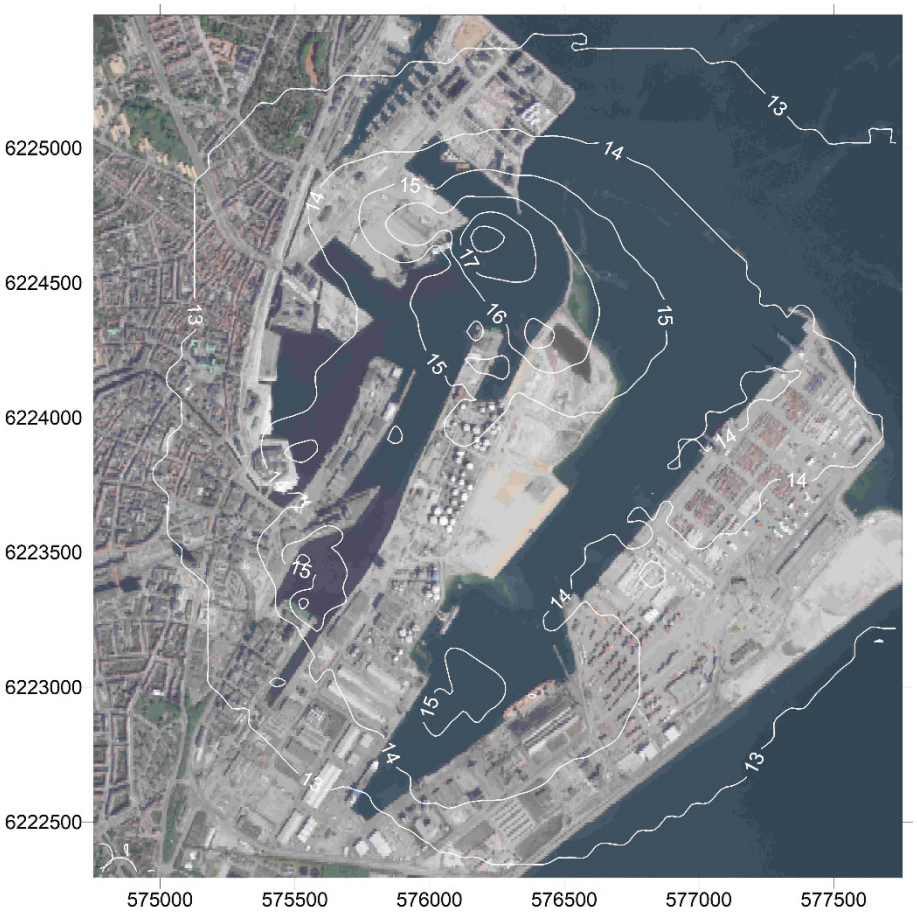
5.4 Aarhus Havn

Årsmiddelkoncentration af NO_2 ved jordoverfladen

Beregningerne er gennemført for 2019 med oplysninger om anløb af krydstogtskibe, emissioner, baggrundsforurening og meteorologi for samme år. Baggrundsforureningen er baseret på målinger fra Botanisk Have i Aarhus under Det nationale overvågningsprogram for luftkvalitet, og i de få tilfælde, hvor der mangler målinger, er der suppleret med modelberegninger fra overvågningsprogrammet (Ellermann et al., 2020a).

Årsmiddelkoncentrationen ved jorden (1,5 m) er visualiseret i Figur 5.11 og består af baggrundskoncentrationen og bidraget fra krydstogtskibe og andre skibe. Luftkvaliteten er illustreret med iso-linjer, dvs. kurver, hvor koncentrationsniveauet er det samme.

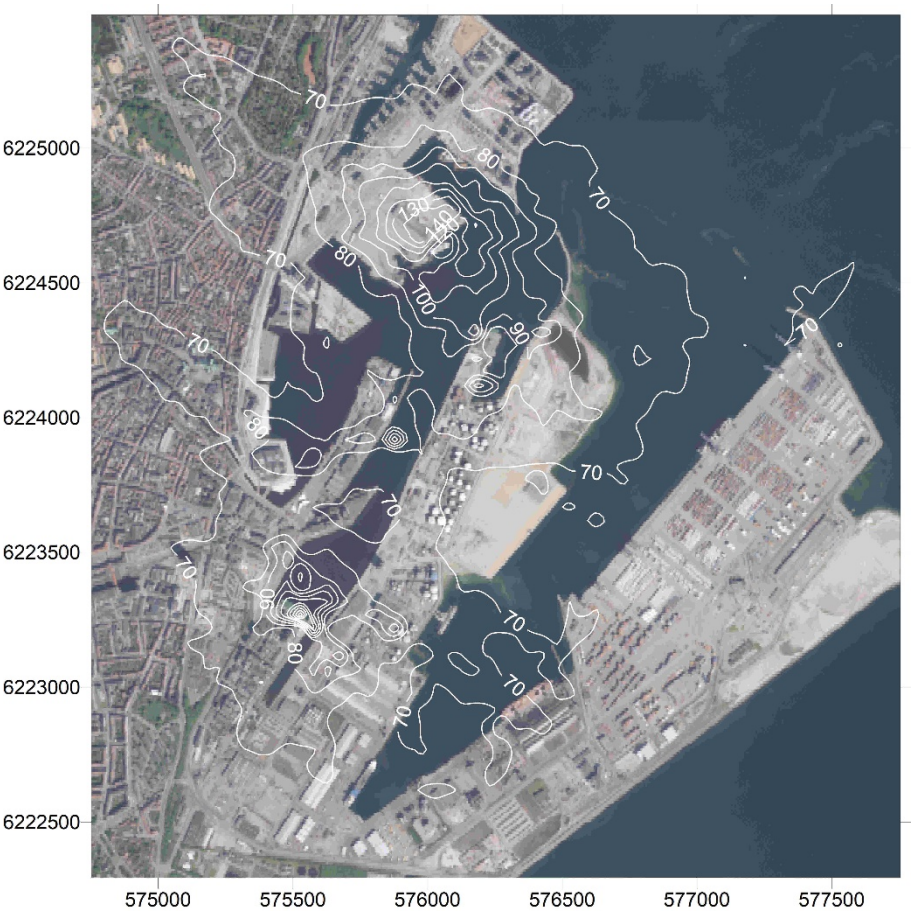
Den højeste middelværdi på 18,6 µg/m³ optræder ved Aarhus Søfartsmuseum øst for terminalen for Molslinjens færger til Sjællands Odde. Værdierne er langt under grænseværdien på 40 µg/m³.



Figur 5.11. Modelleret årsmiddelkoncentration (µg/m³) for NO_2 i 1,5 m for Aarhus i 2019. Bidrag af alle skibe samt baggrundskoncentrationen.

19. højeste timeværdi af NO_2 ved jordoverfladen

Den 19. højeste timeværdi af NO_2 er vist i Figur 5.12. De højeste spidsværdier optræder ved Silovej i den inderste del af havnen med et meget lokalt maksimum på 177 µg/m³, hvilket skyldes en nærliggende stor bygning, som påvirker spredningsforholdene. Der er et lokalt maksimum på ca. 140 µg/m³ ved Aarhus Søfartsmuseum ved terminalen for Molslinjens færger til Sjællands Odde. Værdierne er under grænseværdien på 200 µg/m³. I yderkanten af kortet er niveauet på ca. 68 µg/m³ og nærmer sig baggrundsmålingerne på 58 µg/m³. Til sammenligning er den 19. højeste timeværdi 79 µg/m³ på gadestationen i Banegårdsgade i 2019 (Ellermann et al., 2020a).

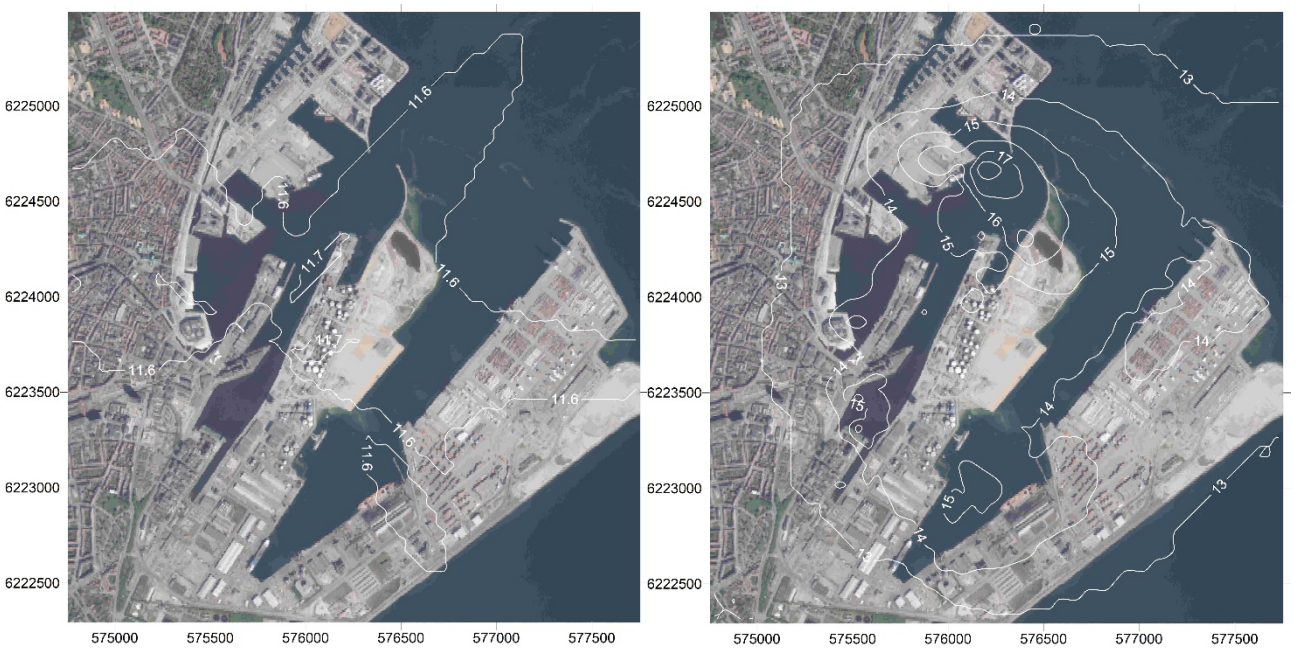


Figur 5.12. Modelleret 19. højeste timeværdi (µg/m^3) for NO_2 i 1,5 m for Aarhus i 2019. Bidrag af alle skibe samt baggrundskoncentrationen.

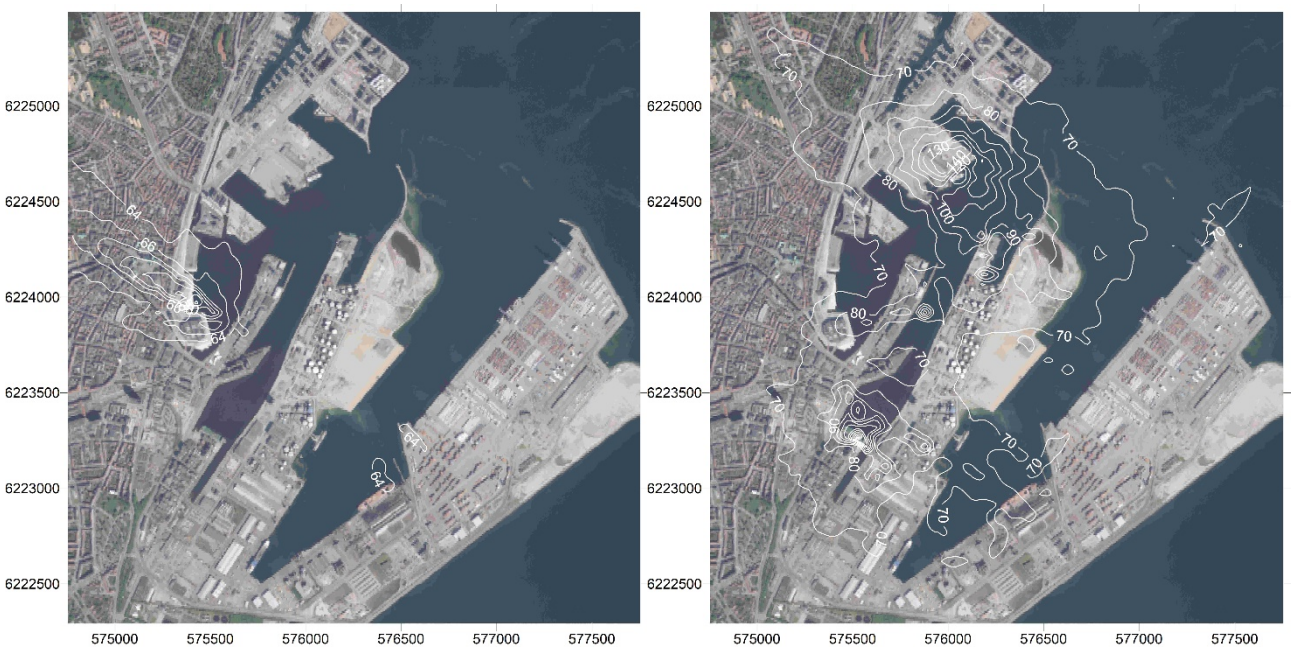
Krydstogtskibenes og andre skibes NO_2-bidrag ved jordoverfladen

I Figur 5.13 er vist årsmiddelkoncentrationen af NO_2 for emissioner alene fra krydstogtskibene respektive andre skibe, begge inklusive baggrundskoncentrationer. For krydstogtskibene er den største værdi 11,7 µg/m^3, hvilket er 0,2 µg/m^3 over baggrundsniveauet på 11,5 µg/m^3. For andre skibe ligner fordelingen til forveksling fordelingen for alle skibe i Figur 5.11. Den højeste værdi er 18,6 µg/m^3 øst for færgeterminalen til Sjællands Odde.

I Figur 5.14 er vist den 19. højeste timeværdi af NO_2 for emissioner alene fra krydstogtskibene respektive andre skibe, begge inklusive baggrundskoncentrationer. For krydstogtskibene er den største værdi 77 µg/m^3, som optræder tæt ved Dokk 1. Baggrundsniveauet er på 58 µg/m^3. For andre skibe ligner fordelingen igen til forveksling fordelingen for alle skibe i Figur 5.12, dog er niveauet lidt mindre nordvest for Dokk 1. Den højeste værdi er 177 µg/m^3 øst for færgeterminalen til Sjællands Odden.



Figur 5.13. Årsmiddelkoncentration (µg/m^3) af NO_2 i 1,5 m i Aarhus for krydstogtskibe (venstre) og andre skibe (højre), samt baggrundskoncentrationen.



Figur 5.14. Den 19. største timekoncentration (µg/m^3) af NO_2 i 1,5 m i Aarhus for krydstogtskibe (venstre) og andre skibe (højre), samt baggrundskoncentrationen.

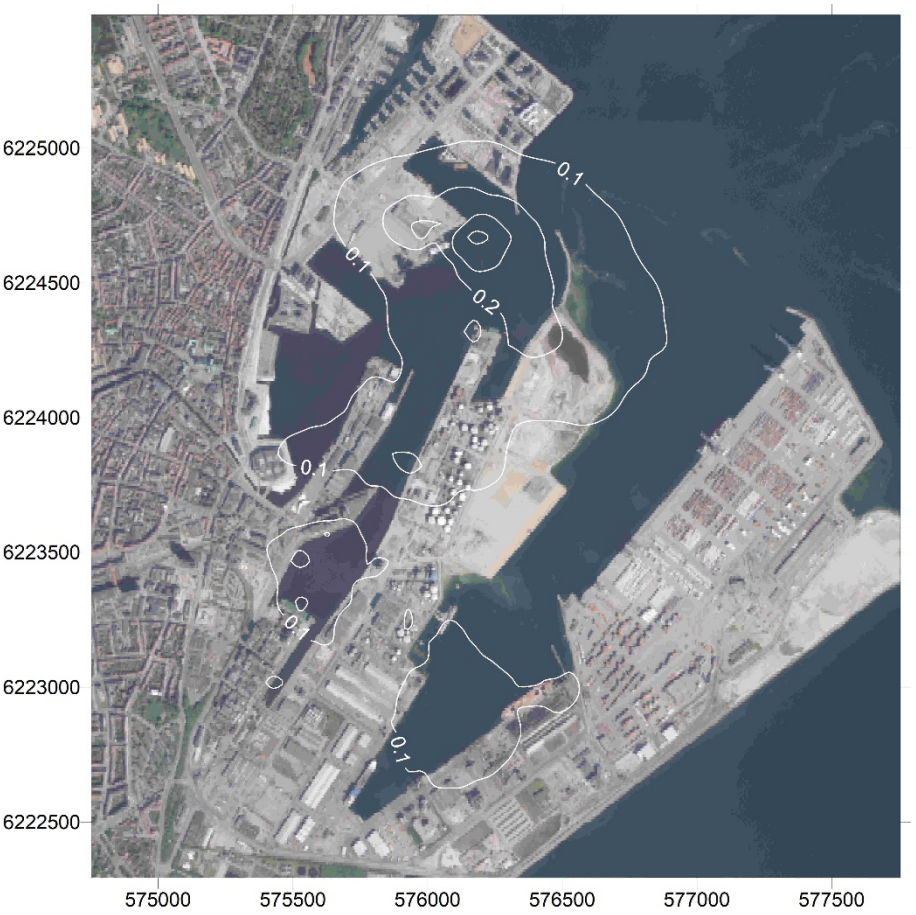
Koncentrationsbidrag til årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$ ved jordoverfladen

I Figur 5.15 er vist koncentrationsbidraget af $PM_{2,5}$ for emission fra alle skibe. Dette kan beregnes uden at inddrage baggrundsforureningen, idet der ikke indgår kemi i beregningerne.

Det højeste koncentrationsbidrag af $PM_{2,5}$ er 0,43 µg/m^3, og optræder samme sted som for NO_2-årsmiddelværdien, dvs. ved Aarhus Søfartsmuseum øst for terminalen for Molslinjens færger til Sjællands Odde.

Ved sammenligning med grænseværdien skal koncentrationerne adderes med værdien på bybaggrundsstationen i Botanisk Have, som er på 9,8 µg/m^3

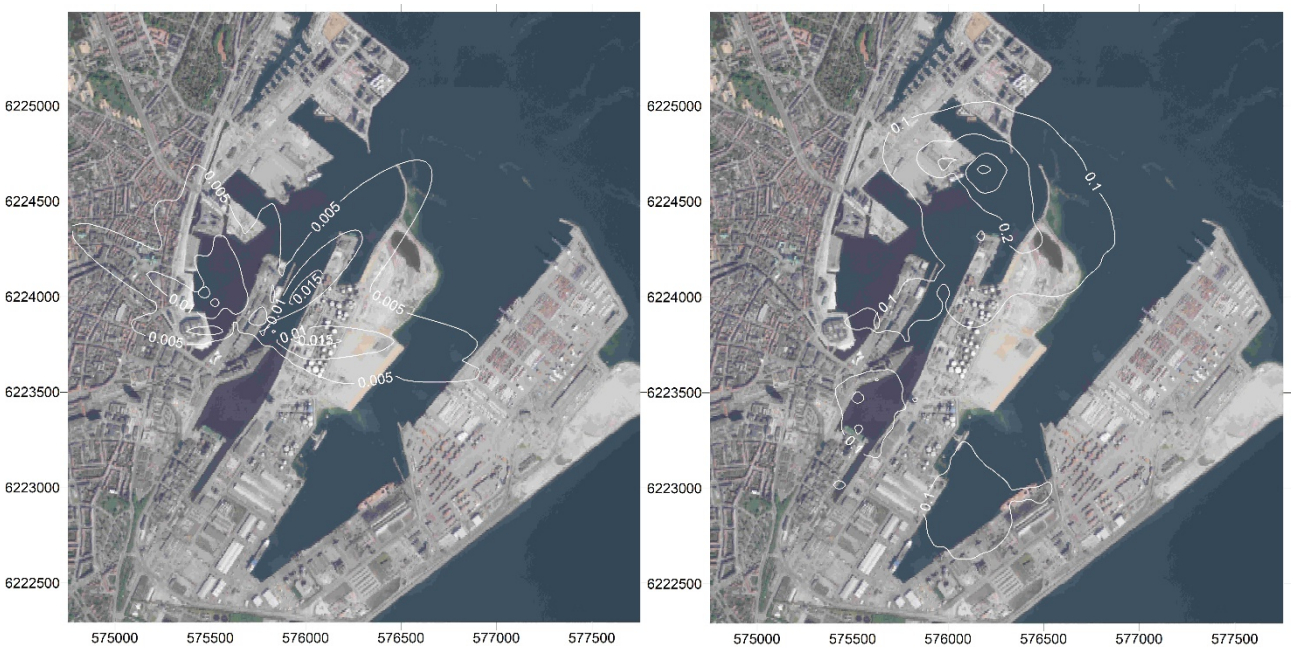
for hele 2019. Maksima er således lille i forhold til grænseværdien på 25 µg/m^3.



Figur 5.15. Bidrag til årsmiddelkoncentration (µg/m^3) af $PM_{2.5}$ i 1,5 m i Aarhus i 2019.

Krydstogtskibenes og andre skibes koncentrationsbidrag til årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$ ved jordoverfladen

I Figur 5.16 er vist beregninger af årsmiddelkoncentrationen af $PM_{2.5}$ for emissioner alene fra krydstogtskibene respektive andre skibe. For krydstogtskibene er den største værdi er 0,017 µg/m^3. For andre skibe ligner fordelingen til forveksling fordelingen for alle skibe i Figur 5.15. Den højeste værdi er 0,43 µg/m^3 øst for færgeterminalen til Sjællands Odde.



Figur 5.16. Bidrag til årsmiddelkoncentration (µg/m^3) af $PM_{2.5}$ i 1,5 m i Aarhus i 2019 for krydstogtskibe (venstre) og andre skibe (højre).

Koncentrationer af NO_2 i højder af 25-70 m

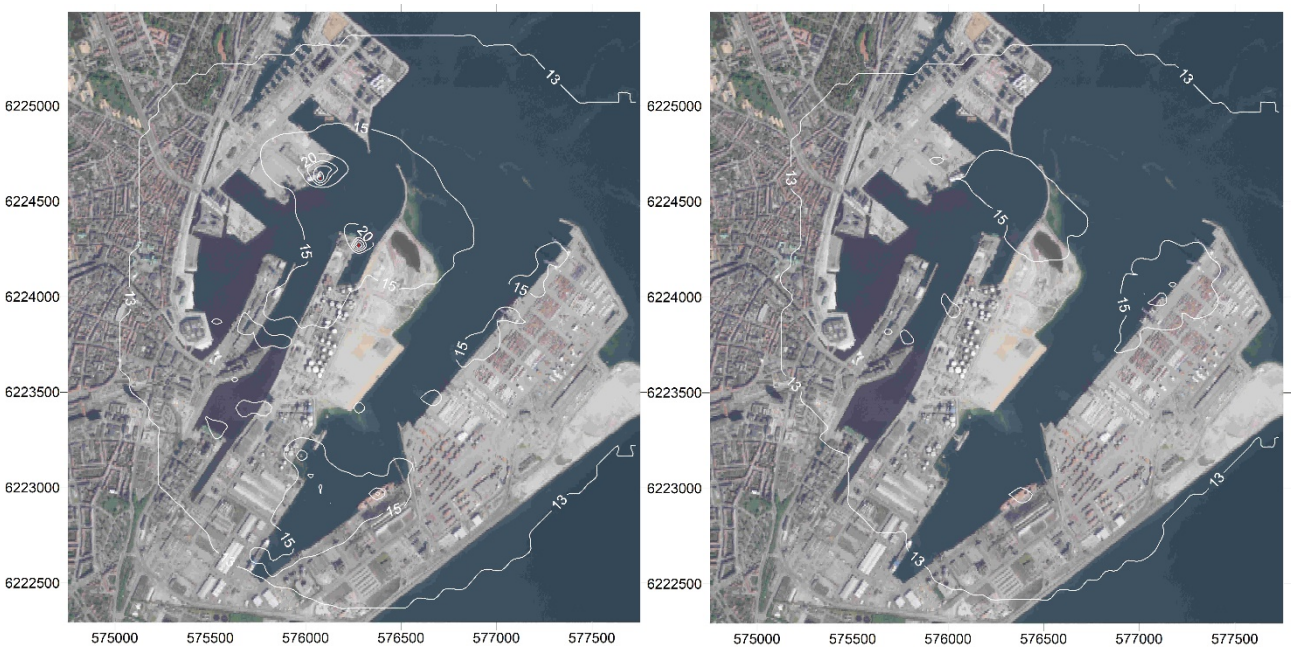
Af Tabel 5.1 fremgår det, at de største koncentrationer beregnes i højder på 25-70 m over jorden. Den geografiske udbredelse vises i det følgende for udvalgte højder.

For årsmiddelværdien af NO_2 er der en mindre overskridelse af grænseværdien på 40 µg/m^3 i 25 m, som det fremgår af Figur 5.17, hvor også koncentrationer for højden 50 m er vist. Overskridelsen optræder dog kun i to punkter, ved terminalerne for færger til Sjællands Odde (Molslinjen) og ved kajplads 203 beliggende centralt i havnen. Koncentrationerne er henholdsvis 40,6 µg/m^3 og 41,8 µg/m^3, og optræder i afstanden 38 m og 16 m fra kajpladser, hvor skibenes skorstenshøjder er henholdsvis 22-24 m og 17-24 m. Arealet inden for iso-linjen for 15 µg/m^3 aftager fra 25 m til 50 m og yderligere i 70 m (ikke vist). De største koncentrationer er bidrag fra andre skibe end krydstogtskibe.

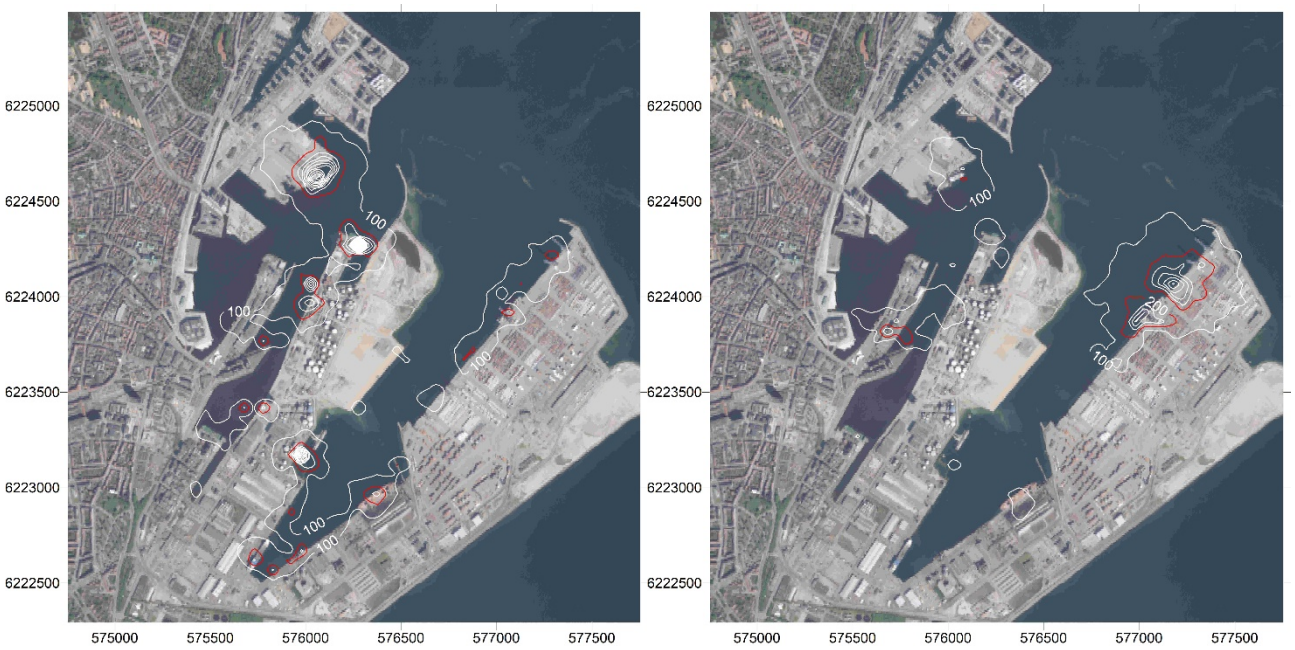
For den 19. største timeværdi af NO_2 er grænseværdien på 200 overskredet i højderne 25, 50 og 70 m. Koncentrationerne er vist i Figur 5.18 og Figur 5.19. I 25 m ses mange, men mindre områder med overskridelse af grænseværdien i hele havnen i nærområderne af kajpladserne og i op til omkring 100 m fra kajpladserne. Den største værdi i 25 m's højde er 1.780 µg/m^3 i et punkt ved kajplads 203, 16 m fra skibsskorstenen. I 50 m og 70 m er overskridelserne begrænset til krydstogtskibe ved kajplads 129 og i den østligste del af havnen.

For årsmiddelværdien af $PM_{2.5}$ optræder den største koncentration på 2,8 µg/m^3 i højden 25 m ved terminalerne for færger til Sjællands Odde, som det er vist i Figur 5.20. I figuren er også vist koncentrationer for højden 70 m, hvor den højeste værdi på 0,63 µg/m^3 optræder i den østligste del af havnen.

I løbet af 2020 er Molslinjens færgeleje flyttet til den sydlige del af Aarhus Havn, og koncentrationsfordelingen vil derfor været anderledes, hvis koncentrationsberegninger blev gentaget for emissionernes placering i 2020.

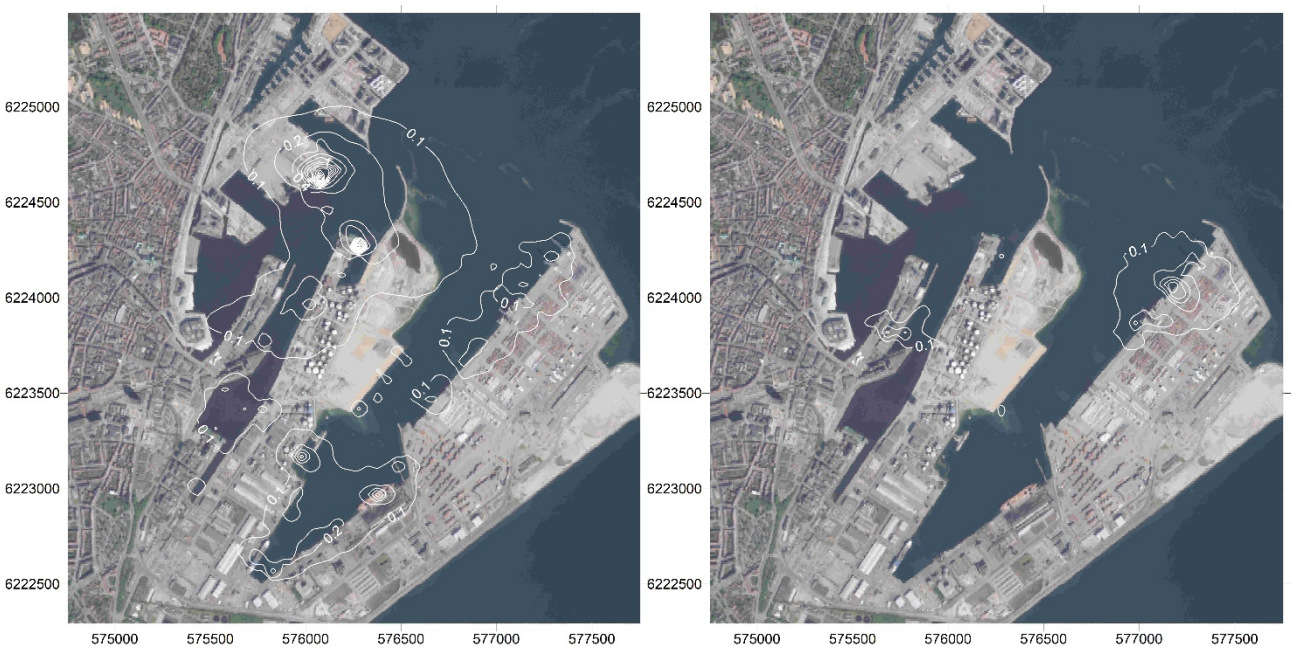


Figur 5.17. Årsmiddelkoncentration (µg/m^3) af NO_2 i Aarhus for alle skibe for højden 25 m (venstre) og 50 m (højre). Iso-kurver for 13, 15, 20, 25 ... 40 µg/m^3.



Figur 5.18. Den 19. største timekoncentration (µg/m^3) af NO_2 i Aarhus for alle skibe i højden 25 m (venstre) og højden 50 m (højre). Iso-linjer for hver 100 µg/m^3, hvor grænseværdien 200 µg/m^3 er rød.

Figur 5.19. Den 19. største timekoncentration (µg/m^3) af NO_2 i Aarhus for alle skibe i højden 70 m (samt baggrundskoncentrationen). Iso-linjer for hver 100 µg/m^3, hvor grænseværdien 200 µg/m^3 er rød.



Figur 5.20. Bidrag til årsmiddelkoncentration (µg/m^3) af $PM_{2,5}$ i Aarhus for alle skibe i højden 25 m (venstre) og 70 m (højre). Iso-linjer for 25 m er 0,1, 0,2, 0,4, 0,6 µg/m^3 etc. og for 70 m 0,1, 0,2, 0,3 µg/m^3 etc.

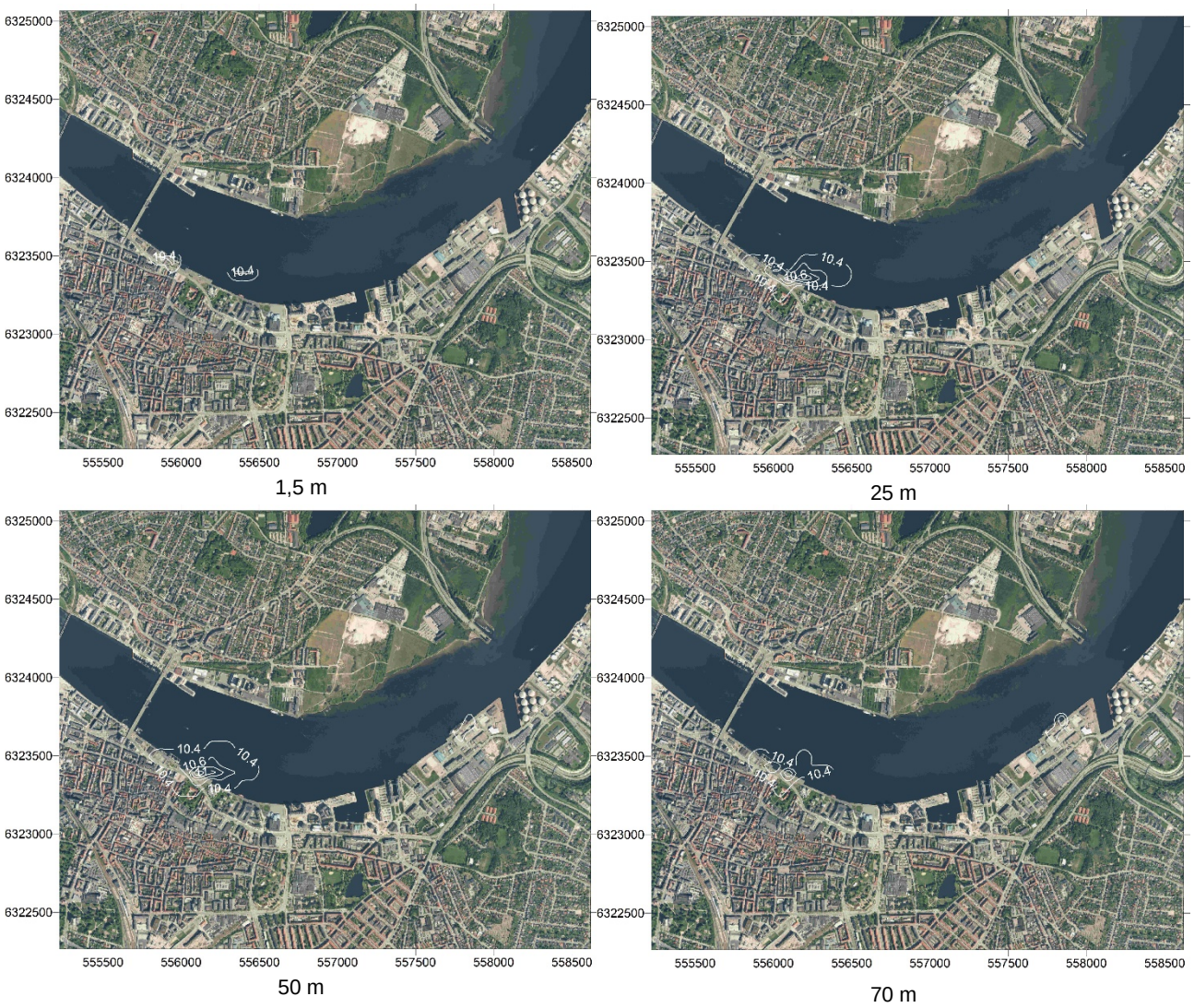
5.5 Aalborg Havn

Årsmiddelkoncentration af NO_2 i forskellige højder

Beregningerne er gennemført for 2019 med oplysninger om anløbs- og liggetider af krydstogtskibe, emissionsberegninger, baggrundsforurening og meteorologi for samme år. Bidrag fra andre skibe er ikke undersøgt i Aalborg Havn. Baggrundsforureningen er baseret på baggrundsmålinger fra Aalborg,

og de få tilfælde, hvor der mangler målinger, er data suppleret med modelberegninger fra overvågningsprogrammet (Ellermann et al., 2020a).

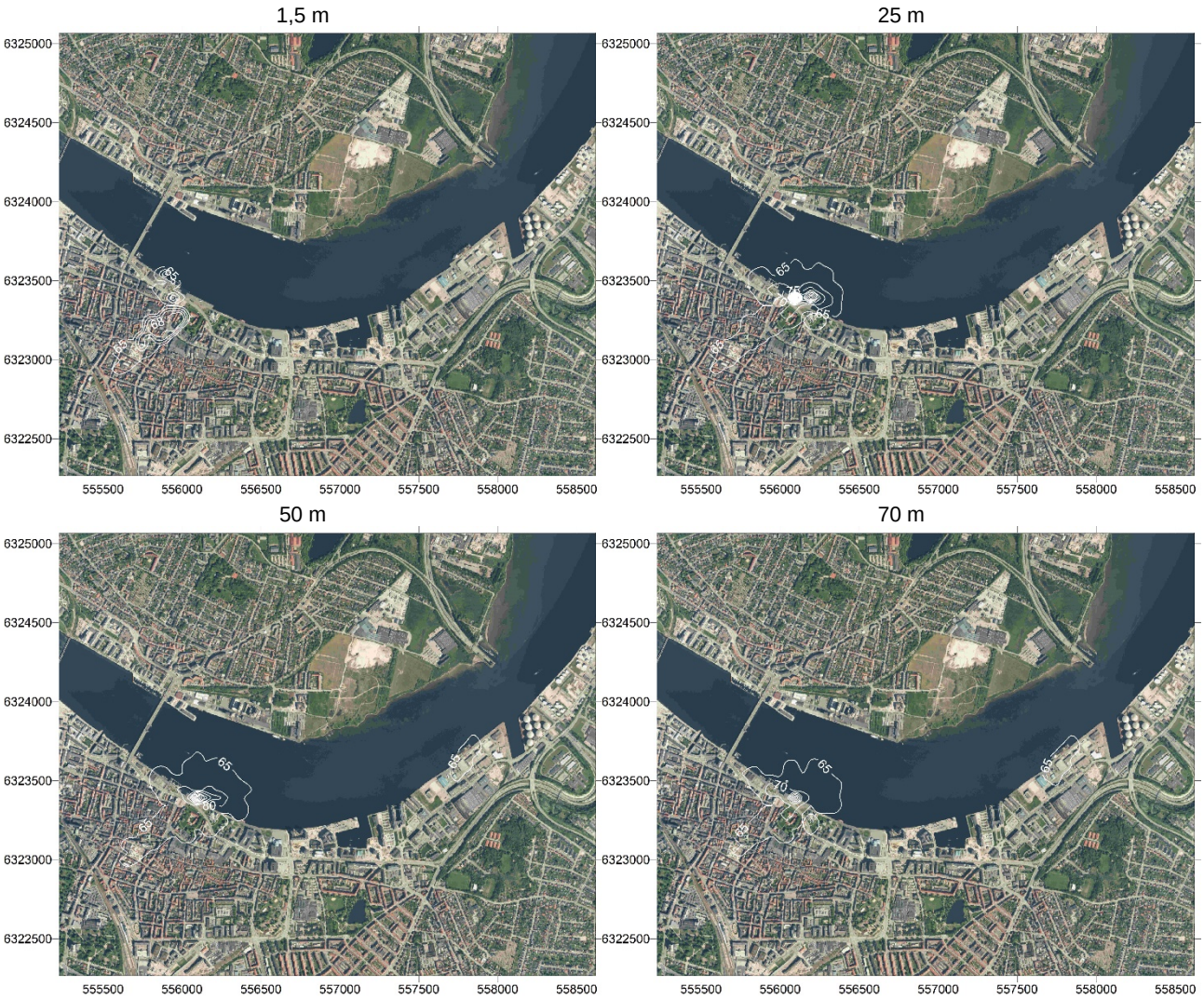
Årsmiddelkoncentrationen i højderne 1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m er visualiseret i Figur 5.21 og består af bidraget fra krydstogtskibe og baggrundskoncentrationen. De maksimale koncentrationer er henholdsvis 10,5 µg/m^3, 10,8 µg/m^3, 11,4 µg/m^3 og 10,7 µg/m^3, hvilket er 0,2-1,1 µg/m^3 over baggrundsniveauet på 10,3 µg/m^3 og langt fra grænseværdien på 40 µg/m^3.



Figur 5.21. Årsmiddelkoncentration (µg/m^3) af NO_2 i Aalborg for krydstogtskibe i højderne 1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m (samt baggrundskoncentrationen).

19. højeste timeværdi af NO_2 i forskellige højder

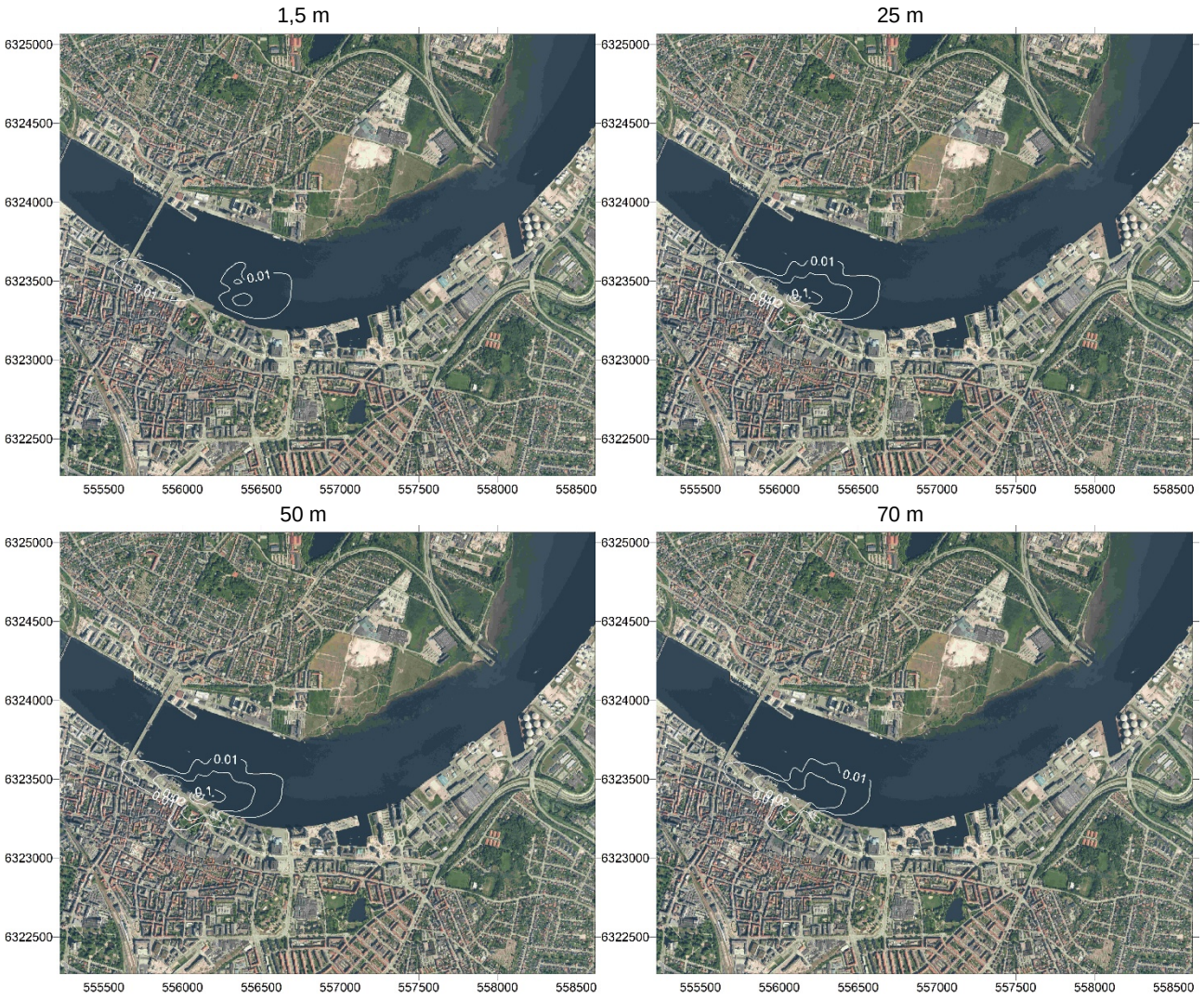
Den 19. højeste timeværdi af NO_2 fra krydstogtskibe er vist i Figur 5.22 for højderne 1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m. De højeste spidsværdier er henholdsvis 69 µg/m^3, 134 µg/m^3, 237 µg/m^3 og 97 µg/m^3, hvorved der er overskridelse af grænseværdien på 200 µg/m^3 i 50 m's højde. Overskridelsen forekommer i den umiddelbare nærhed af kajplads 4041 ud for Aalborghus Slot. Baggrundsværdien er 64 µg/m^3. Gademålestationen på Vesterbro er flyttet til en ny placering på Vesterbro. Den nye stationer er først taget i brug i slutningen af 2019, derfor kan der ikke foretages en sammenligning med den 19. højeste for denne station, da det kræver et års målinger.



Figur 5.22. Den 19. største timekoncentration (µg/m^3) af NO_2 i Aalborg for krydstogtskibe i højderne 1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m.

Koncentrationsbidrag til årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$ i forskellige højder

I Figur 5.23 er vist koncentrationsbidraget af $PM_{2,5}$ fra krydstogtskibe i højderne 1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m. Dette kan beregnes uden at inddrage baggrundsforureningen, idet der ikke indgår kemi i beregningerne. Det højeste koncentrationsbidrag er 0,33 µg/m^3, som optræder i 50 m's højde. Baggrundsniveauet på målestation i Aalborg er 10,0 µg/m^3 og inkl. det højeste koncentrationsbidrag er dette langt under grænseværdien på 25 µg/m^3.



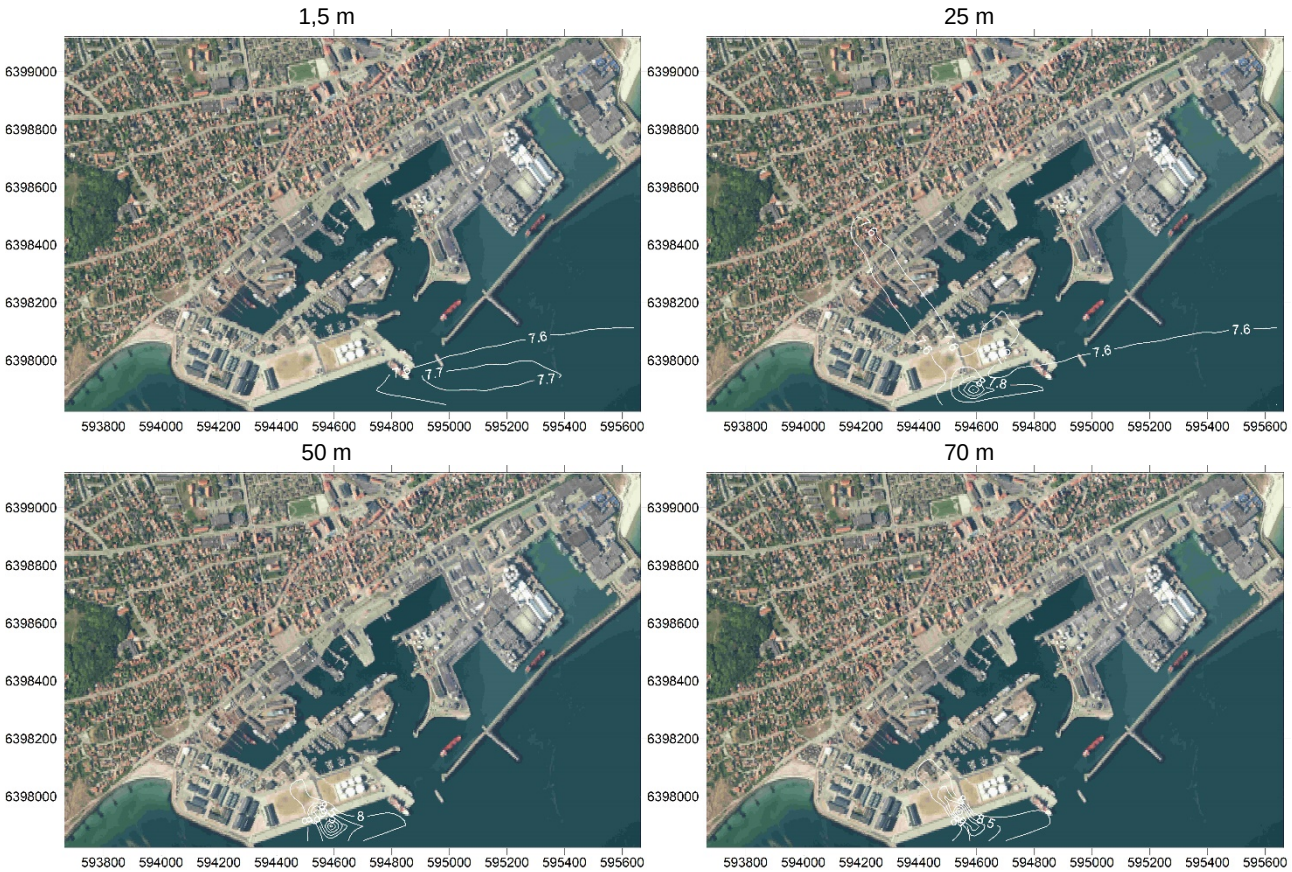
Figur 5.23. Bidrag til årsmiddelkoncentration (µg/m^3) af $PM_{2.5}$ i Aalborg for krydstogtskibe i højderne 1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m. Iso-linjer er 0,01 µg/m^3, 0,02 µg/m^3, 0,1 µg/m^3, 0,2 µg/m^3 og 0,3 µg/m^3.

5.6 Skagen Havn

Årsmiddelkoncentration af NO_2

Beregningerne er gennemført for 2019 med oplysninger om anløb af krydstogtskibe, emissioner, baggrundsforurening og meteorologi for samme år. Baggrundsforureningen er baseret på værdier beregnet med DEHM-modellen, som også benyttes i det nationale overvågning af luftkvaliteten i Danmark (e.g. Ellermann et al., 2020a). Bidraget fra andre skibe er ikke undersøgt i Skagen Havn.

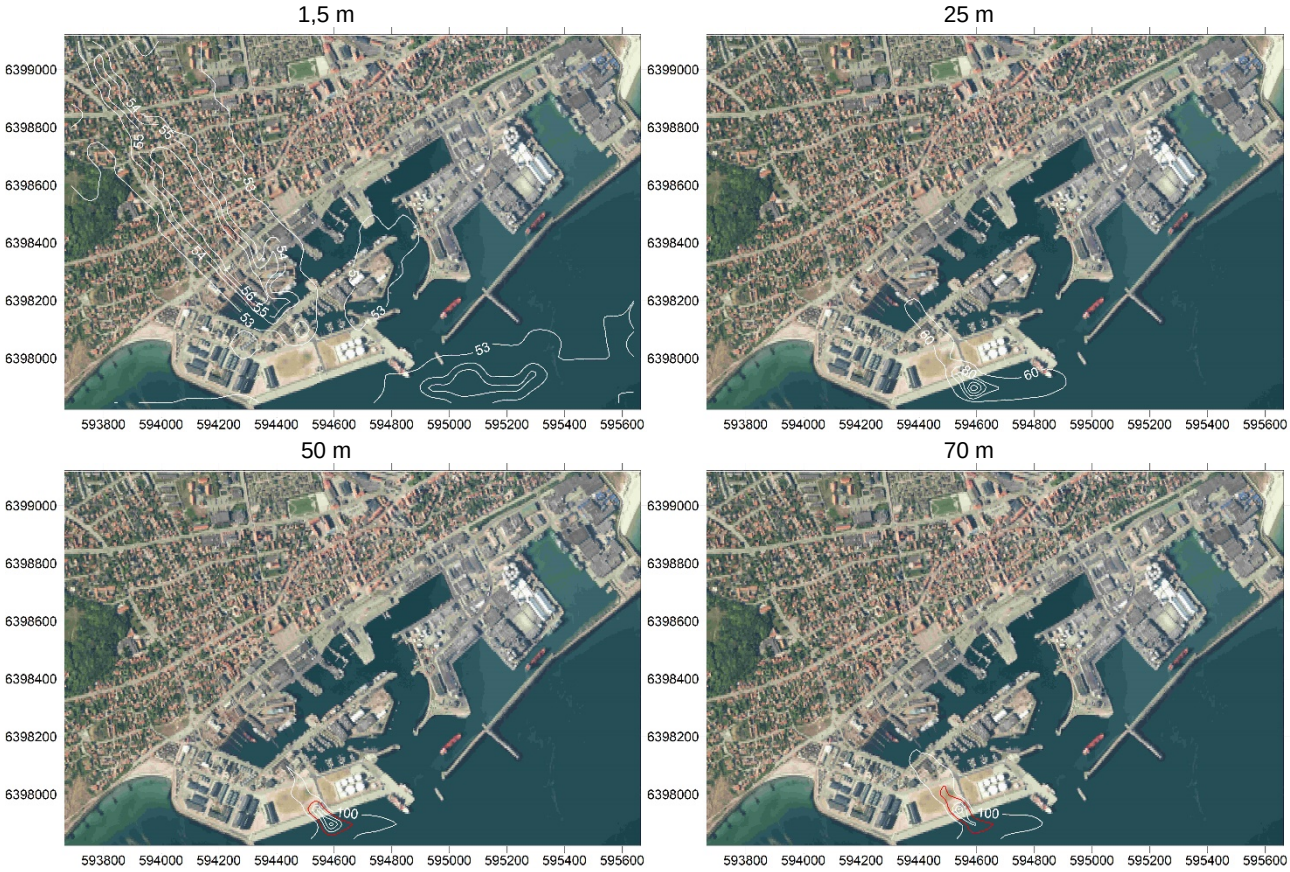
Årsmiddelkoncentrationen i højderne 1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m er visualiseret i Figur 5.24 og består af bidraget fra krydstogtskibe og baggrundskoncentrationen. De maksimale koncentrationer er henholdsvis 7,7 µg/m^3, 8,6 µg/m^3, 11,2 µg/m^3 og 10,7 µg/m^3, hvilket er 0,2-0,7 µg/m^3 over baggrundsniveauet på 7,5 µg/m^3 og langt fra grænseværdien på 40 µg/m^3.



Figur 5.24. Årsmiddelkoncentration (µg/m^3) af NO_2 i Skagen for krydstogtskibe i højderne 1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m (samt baggrundskoncentrationen).

19. højeste timeværdi af NO_2

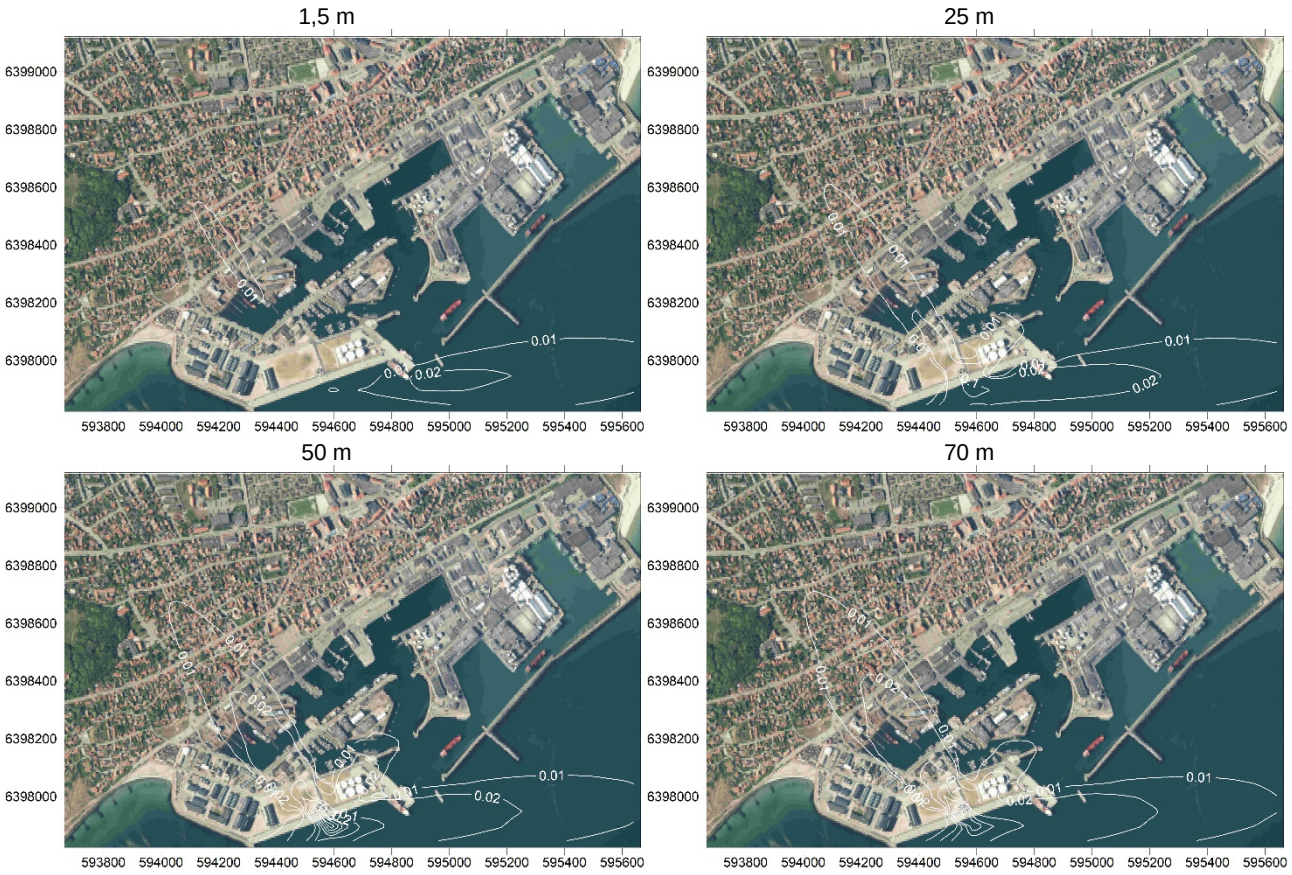
Den 19. højeste timeværdi af NO_2 fra krydstogtskibe samt baggrundskoncentrationen er vist i Figur 5.25 for højderne 1,5, 25, 50 og 70 m. De højeste spidsværdier er henholdsvis 57, 159, 551 og 517 µg/m^3, hvorved der er overskridelse af grænseværdien på 200 µg/m^3 i 50 m og 70 m's højde. Overskridelserne forekommer i nærområdet af kajplads 9 i op til omkring 150 m af kajpladsen. Baggrundsværdien er 52 µg/m^3.



Figur 5.25. Den 19. største timekoncentration (µg/m^3) af NO_2 i Skagen for krydstogtskibe (samt baggrundskoncentrationen) i højderne 1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m. Iso-linjer for hver 100 µg/m^3, hvor grænseværdien på 200 µg/m^3 er rød.

Koncentrationsbidrag til årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$

I Figur 5.26 er vist koncentrationsbidraget af $PM_{2,5}$ fra krydstogtskibe i højderne 1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m. Dette kan beregnes uden at inddrage baggrundsforureningen, idet der ikke indgår kemi i beregningerne. Det højeste koncentrationsbidrag er 0,78 µg/m^3, som optræder i 70 m's højde. I jordniveau er bidraget 0,02 µg/m^3. Disse bidrag plus baggrundsniveauet på 6,0 µg/m^3 er langt under grænseværdien på 25 µg/m^3.



Figur 5.26. Bidrag til årsmiddelkoncentration (µg/m^3) af $PM_{2.5}$ i Skagen for krydstogtskibe i højderne 1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m. Iso-linjer er 0,01, 0,02, 0,1, 0,2, 0,3 µg/m^3 etc.

5.7 Rønne Havn

Årsmiddelkoncentration af NO_2 i forskellige højder

Beregningerne er gennemført for 2019 med oplysninger om anløb af krydstogtskibe, emissioner, baggrundsforurening og meteorologi for samme år. Baggrundsforureningen er baseret på værdier beregnet med DEHM-modellen, som også benyttes i det nationale overvågning af luftkvaliteten i Danmark (e.g. Ellermann et al., 2020a). I Rønne Havn er det alene krydstogtskibe, som er belyst, og andre skibe er ikke inddraget.

Årsmiddelkoncentrationen i højderne 1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m er visualiseret i Figur 5.21 og består af bidraget fra krydstogtskibe og baggrundskoncentrationen. De maksimale koncentrationer er henholdsvis 8,7 µg/m^3, 9,3 µg/m^3, 9,2 µg/m^3 og 8,8 µg/m^3, hvilket er 0,3-0,6 µg/m^3 over baggrundsniveauet på 8,4 µg/m^3 og langt fra grænseværdien på 40 µg/m^3.

19. højeste timeværdi af NO_2 i forskellige højder

Den 19. højeste timeværdi af NO_2 fra krydstogtskibe er vist i Figur 5.22 for højderne 1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m. De højeste spidsværdier er henholdsvis 56 µg/m^3, 123 µg/m^3, 128 µg/m^3 og 78 µg/m^3. Her er ingen overskridelse af grænseværdien på 200 µg/m^3. Baggrundsværdien er 41 µg/m^3.

Figur 5.27. Årsmiddelkoncentration (µg/m^3) af NO_2 i Rønne for krydstogtskibe (samt baggrundskoncentrationen) i højderne 1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m.

Figur 5.28. Den 19. største timekoncentration (µg/m^3) af NO_2 i Rønne for krydstogtskibe (samt baggrundskoncentrationen) i højderne 1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m. For højden 1,5 m er der iso-linjer for hver 1 µg/m^3 og for de øvrige for hver 10 µg/m^3.

Koncentrationsbidrag til årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$ i forskellige højder

I Figur 5.29 er vist koncentrationsbidraget af $PM_{2,5}$ fra krydstogtskibe i højderne 1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m. Dette kan beregnes uden at inddrage baggrundsforureningen, idet der ikke indgår kemi i beregningerne. Det højeste koncentrationsbidrag er 0,11 µg/m^3, som optræder i 50 m's højde. Disse bidrag plus baggrundsniveauet på 8,0 µg/m^3 er langt under grænseværdien på 25 µg/m^3.

Figur 5.29. Bidrag til årsmiddelkoncentration (µg/m^3) af $PM_{2.5}$ i Rønne for krydstogtskibe i højderne 1,5 m, 25 m, 50 m og 70 m. Iso-linjer er 0,01, 0,02, 0,04 og 0,1 µg/m^3.

5.8 Sammenligning med andre undersøgelser

Grænseværdi for NO_2 muligvis overskredet i jordniveau i 2003

En undersøgelse fra det nu nedlagte Institut fra Miljøvurdering (IMV) pegede i 2003 på, at krydstogtskibes bidrag til luftforurening i og omkring Københavns Havn kunne være så stort, at grænseværdierne for kvælstofdioxid (NO_2), som skulle være opfyldt fra 2010, ville blive overskredet ved jordoverfladen (Saxe og Larsen, 2003).

På den baggrund iværksatte Miljøstyrelsen i 2004 sammen med Københavns Kommune, Københavns Havn og Copenhagen Malmø Port en undersøgelse af krydstogtskibes forurening i Københavns Havn i 2004 på baggrund af undersøgelse af anløb af krydstogtskibe, emissioner og luftkvalitetsberegninger. Undersøgelsen blev gennemført af det daværende Danmarks Miljøundersøgelser med bistand fra FORCE Technology (Olesen & Berkowicz, 2005). Denne undersøgelse konkluderede, at krydstogtskibene kun har potentiale til

at påvirke den 19. højeste timeværdi af NO_2 med ganske lidt og kun i den umiddelbare nærhed af kajpladserne, og grænseværdien på 200 µg/m^3 er langt fra at være overskredet. Endvidere er krydstogtskibenes bidrag til den gennemsnitlige NO_2-forurening på årsbasis meget lille, og ligeledes langt fra at medvirke til overskridelse af grænseværdien for årsmiddelværdien. Alle beregninger blev foretaget ved jordoverfladen.

Overskridelse af grænseværdi for spidsværdi for NO_2 i højder af 25-70 m

Miljø- og Fødevareministeriet iværksatte i 2018 en undersøgelse af anløb af krydstogtskibe i Københavns Havn og Aarhus Havn i 2017, de tilhørende emissioner, og hvordan krydstogtskibene påvirker luftkvaliteten i tilstødende byområder og i nærområdet tæt på krydstogtskibenes kajpladser. Undersøgelsen blev gennemført af DCE (Jensen et al., 2019). Konklusionerne fra denne undersøgelse var i overensstemmelse med tidligere konklusioner for Københavns Havn, og det samme gjaldt for årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$, som også blev undersøgt. Som noget nyt inkluderede rapporten også undersøgelser af bidragene i højder af 25 m, 50 m og 70 m, da der var en interesse i at undersøge, hvordan boligbyggeri mv. i havnene kunne blive påvirket af luftforureningen fra krydstogtskibene. Hvor grænseværdien ikke var overskredet for beregninger af den 19. højeste timeværdi for NO_2 ved jordoverfladen, så blev den overskredet i de undersøgte højder af 25 m, 50 m og 70 m i både Københavns Havn og Aarhus Havn. Overskridelserne sker i nærområderne af kajpladserne, hvor grænseværdien på 200 µg/m^3 er overskredet flere hundrede procent.

Udviklingen over 5 år i luftforurening fra skibe i 5 havne

Nærværende rapport har set på emissionsudviklingen over en 5-årig periode (2015-2019) for fem havne for krydstogtskibe, og for to af havnene også for andre skibe. Skibenes påvirkning af luftkvaliteten er beregnet i 2019 for samme højder som tidligere. Undersøgelsen har endvidere opgjort emissioner af drivhusgasser. Nærværende rapport med luftkvalitetsberegninger for 2019 bekræfter den tidligere rapport med beregninger for 2017. Der er overskridelser af den 19. højeste timeværdi for NO_2 i alle havnene for alle eller nogle af højderne 25 m, 50 m og 70 m, undtagen for Rønne Havn, hvor der ikke beregnes overskridelse af den 19. højeste timeværdi for NO_2. Nærværende rapport har som noget nyt vist, at årsmiddelværdien af NO_2 i Aarhus Havn i højden 25 m har en mindre overskridelse af grænseværdien på 40 µg/m^3 i to punkter, som ligger 16-38 m fra kajpladser, hvor skibenes skorstenshøjder er henholdsvis 22-24 m og 17-24 m. Overskridelsen kan primært tilskrives bidrag fra andre skibe.

Helbredseffekter af luftforurening fra krydstogtskibe

Ovenstående undersøgelser har alene belyst forhold omkring emission og luftkvalitet af skibe i udvalgte danske havne. Helbredseffekter af luftforureningen fra krydstogtskibe i Københavns Havn og Aarhus Havn i 2017 er beregnet i forbindelse med afrapportering af det nationale overvågningsprogram for luftkvalitet for 2019 (Ellermann et al., 2021). Emissionerne er baseret på Jensen et al. (2019). Disse beregningerne viser, at krydstogtskibene bidrager til ca. 3 for tidlige dødsfald og ca. 2.500 sygedage i København og i Aarhus tilsammen. De totale samfundsmæssige omkostninger relateret til helbredseffekter fra krydstogtskibene er beregnet til ca. 54 mio. kr. om året, hvoraf de ca. 12 mio. kr. skyldes effekter fra NO_2 og ca. 42 mio. kr. skyldes helbredseffekter fra emission af partikler.

5.9 Usikkerhed på modelberegningerne

Der er en række usikkerheder knyttet til beregningerne af skibenes bidrag til luftkvaliteten.

Der kan være en mindre usikkerhed om, hvor præcist skibene har ligget ved kaj. Ud over en kajplads for anløb af et skib angives også i nogle tilfælde et pælenummer, men disse er ikke vist på kortene fra havnene, så disse oplysninger har ikke kunnet anvendes. Dette bidrager til en lille usikkerhed om, hvor skibet præcist har ligget i disse tilfælde.

Som det fremgår, er bestemmelse af emissionen fra skibene komplekst og hviler på mange forudsætninger, hvilket bidrager til usikkerhed. Det samme gælder for bestemmelse af de fysiske parametre som fx afkasthøjde på skorstenen.

Baggrundskoncentrationen er i København, Aarhus og Aalborg baseret på målinger med mindre usikkerhed, mens det for Skagen og Rønne er baseret på modelberegninger, hvor usikkerheden er større.

Der er anvendt meteorologisk data baseret på data fra vejrmodellen WRF (Weather Research and Forecast Modeling System). Det er en international model, som mange forskningsgrupper bidrager til at udvikle og validere mod målinger.

Da forskelle i meteorologi fra år til år har betydning for koncentrationsniveauerne, er der i nærværende rapport belyst, hvor forskellige de relevante meteorologiske parmetre er i perioden 2015-2019. På baggrund af analyser af vindretning er 2019 valgt som meteorologisk år, da det bedst ligner gennemsnittet for en lang årrække, og samtidig er det seneste år med emissionsdata. 2019 kan derfor anses som et meteorologisk repræsentativt år. Havde vi valgt et andet år, ville dette havde givet lidt andre resultater. I forbindelse med den tidligere rapport om krydstogtskibe og luftforurening i Københavns Havn og Aarhus Havn (Jensen et al., 2019) blev det belyst, hvad betydningen er af at gennemføre beregninger med et år med megen østenvind. Analysen af et meteorologisk år fra 2002 med megen østenvind viste, at fordelingen af luftforureningen fra krydstogtskibene påvirkes heraf, således at de højeste koncentrationsbidrag fra krydstogtskibene som forventet i højere grad ligger vest for kajpladserne.

Endelig er der usikkerheder knyttet til selve OML-modellen og dens beskrivelse af fysiske og kemiske forhold.

En måde at vurdere den samlede usikkerhed på modelberegningerne er at sammenligne med målinger. Det har ikke været muligt inden for rammerne af nærværende projekt at gennemføre målekampagner og sammenligning med modelresultaterne. Dette er både dyrt og tidskrævende.

I forbindelse med den tidligere rapport om krydstogtskibe og luftforurening i Københavns Havn og Aarhus Havn (Jensen et al., 2019) blev der foretaget en indikativ sammenligning mellem modelberegninger og en målekampagne på Langelinie i Københavns Havn, hvor FORCE Technology har gennemført luftkvalitetsmålinger i perioden maj til september 2018 for Copenhagen Malmö Port AB. Det var ikke umiddelbart muligt at foretage direkte detaljerede sammenligninger mellem måleresultater herfra og de gennemførte modelberegninger, da undersøgte anløb af krydstogtskibe var fra 2017. Der er

gennemført modelberegninger for det pågældende sted for 2017, og dette er sammenholdt med gennemsnitsværdien af måleresultaterne fra 2018 for at give en indikation af forskellene.

Modelberegningerne ligger som forventeligt tæt på målingerne for NO_2 for middelværdien, selvom der regnes for to forskellige år, hvor modelberegningerne er for 2017 og målingerne er udført i 2018. Det er også forventeligt, at der er store forskelle i den beregnede spidsværdi (den 19. højeste for NO_2), da denne er langt mere følsom over for forskelle i anløb af krydstogtskibe, meteorologi og baggrundsforurening mellem de to år.

Modelberegningerne viser ligesom målingerne, at koncentrationsniveauerne er langt under grænseværdierne for middelværdien og 19. højeste timeværdi af NO_2.

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).

Berkowicz, R. (2000a): A Simple Model for Urban Background Pollution. Environmental Monitoring and Assessment Vol. 65, Issue 1/2, pp. 259-267.

Brandt, J., Christensen, J.H., Frohn, L.M., Palmgren, F., Berkowicz, R., Zlatev, Z. (2001): Operational air pollution forecasts from European to local scale. Atmospheric Environment, Vol. 35, Sup. No. 1, pp. S91-S98, 2001.

Brandt, J., J. D. Silver, L. M. Frohn, C. Geels, A. Gross, A. B. Hansen, K. M. Hansen, G. B. Hedegaard, C. A. Skjøth, H. Villadsen, A. Zare, and J. H. Christensen (2012): An integrated model study for Europe and North America using the Danish Eulerian Hemispheric Model with focus on intercontinental transport. *Atmospheric Environment*, Volume 53, June 2012, pp. 156-176, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.01.011.

Christensen, J.H. (1997): The Danish Eulerian Hemispheric Model – a three-dimensional air pollution model used for the Arctic. Atmospheric Environment., 31, 4169–4191.

COWI (2019): Analyse af alternative energikilder til krydstogtskibe. Bilag 1. Udført for Københavns Kommune. Februar 2019.

Danmarks Statistik, 2020: SKIB72: Godsomsætning på større danske havne efter havn, retning og godsart, Danmarks Statistiks Statistikbank.

Ellermann, T., Nordstrøm, C., Nygaard, J., Massling, A. (2020a): Status for måling af luftkvalitet i 2019. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 14 s.– Notat nr. 2020|41. http://dce2.au.dk/pub/-komm/N2020_41_komm.pdf

Thomas Ellermann, Claus Nordstrøm, Jørgen Brandt, Jesper Christensen, Matthias Ketzel, Andreas Massling, Rossana Bossi, Lise Marie Frohn, Camilla Geels, Steen Solvang Jensen, Ole-Kenneth Nielsen, Morten Winther, Maria Bech Poulsen, Jesper Nygaard og Jacob Klenø Nøjgaard. 2021. Luftkvalitet 2019. Status for den nationale luftkvalitetsovervågning. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, - Videnskabelig rapport nr. 410. http://dce2.au.dk/pub/SR410.pdf

EU (2008): EUROPA-PARLAMENTETS OG RÅDETS DIREKTIV 2008/50/EF af 21. maj 2008 om luftkvaliteten og renere luft i Europa.

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 Fragkoulis, Svitzer.

Hansen, 2020a: Anløbsdata 2015-2019 for krydstogtskibe tilsendt fra Københavns Havn, Verner Biener Hansen.

Hansen, 2020b: Personlig kommunikation, Jens Peter Hansen, ECA engineering.

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'Keeffe, 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/ Third Greenhouse Gas Study/GHG3 Executive Summary and Report.pdf.

IMO (2018): Air pollution and Energy Efficiency – Sulphur monitoring for 2018, IMO Marine Environment Protection Committee.

IPCC, 2006: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. & Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. Available at:
http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html (21-02-2014).

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

Jensen, 2020: Anløbsdata 2015-2019 for krydstogtskibe tilsendt fra Skagen Havn, Anne Sofie Rønne Jensen.

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.

Kristensen, 2020: Oplysninger om motorbelastning for hjælpemotorer, personlig kommunikation, Hans Otto Kristensen, HOK Marineconsult ApS.

Kruse, C. 2015: Data tilsendt fra Samsø Rederi.

Lind, 2020: Anløbsdata 2015-2019 for krydstogtskibe tilsendt fra Aalborg Havn, Michael Rosenkilde Lind.

Lundberg, 2020: Anløbsdata 2015-2019 for krydstogtskibe tilsendt fra Rønne Havn, Niels Lundberg.

MAN Energy Solutions, 2012: Data tilsendt af Michael Finch Petersen, Low Speed Marine R&D, (tidligere MAN Diesel & Turbo), København.

Miljøstyrelsen (2001): Luftvejledningen. Vejledning fra Miljøstyrelsen, nr. 2, 2001.

Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkærne, 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.

Nielsen, 2020: Oplysninger om hjælpemotoreffekt ved kaj for Molslinjens færger, Dan Nielsen.

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.

Olesen, H.R., Berkowicz, R.B, Løfstrøm, P. (2007): OML: Review of model formulation. National Environmental Research Institute, Denmark. 130pp. - NERI Technical Report No. 609, www.dmu.dk/Pub/FR609.

Olesen, H.R., Winther, M., Ellermann, T., Christensen, J., Plejdrup, M.S. (2009): Ship emissions and air pollution in Denmark. Environmental Project No. 1307, 2009. Danish Environmental Protection Agency.

Oxbøl, A., Wismann, T., 2003: Emissioner fra skibe i havn, Arbejdsrapport nr. 11 fra Miljøstyrelsen, 62 pp.

Rosenbeck (2019): Data tilsendt fra Aalborg Havn af Claus Rosenbeck.

Rytter, 2020: Anløbsdata 2016-2019 for skibe tilsendt fra Aarhus Havn, Birgitte Rytter.

Saxe, H. & Larsen, T. (2003): Luftforurening fra skibe i danske havne. Stads- og havneingeniøren 9, 5-12.

Skamarock, W. C., J. B., Klemp, J. Dudhia, D. O., Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang and J. G. Powers, 2008: "A Description of the Advanced Research WRF version 3". NCAR Tech Note NCAR/TN-475+STR, 113p. doi:10.5065/D68S4MVH.

Starcrest, 2013: Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions – 2012. Available at: http://www.portoflosangeles.org/pdf/2012_Air_Emissions_Inventory.pdf

Sønnichsen, 2020: Anløbsdata 2015 for skibe tilsendt fra Aarhus Havn, Inge Sønnichsen.

Transportministeriet, 2015: TEMA2015 - et værktøj til at beregne transporters energiforbrug og emissioner i Danmark. Teknisk rapport, 126 pp.

WHO, 2006. Air Quality Guidelines, Global Update 2005. 2006.

Winther, M. 2020: Danish emission inventories for road transport and other mobile sources. Inventories until the year 2018. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 132pp. Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy No. 411. http://dce2.au.dk/pub/SR411.pdf

Woodall, 2020: Oplysninger om scrubber installeret ombord på DFDS færger, personlig kommunikation, Paul Woodall.

Bilag 1 Liste med anløb af skibe i havnene

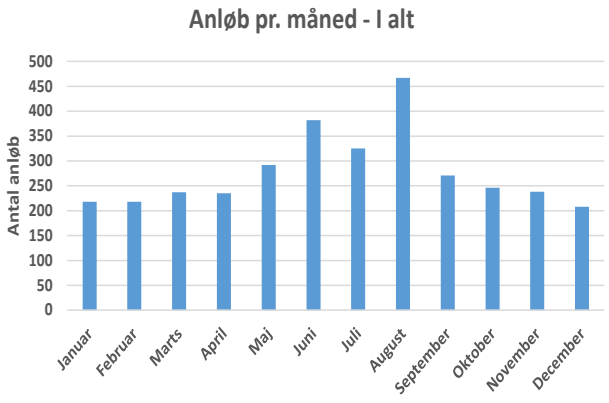
Data er indeholdt i filen http://dce2.au.dk/pub/SR413_Bilag1.xlsx (Anløbslister).

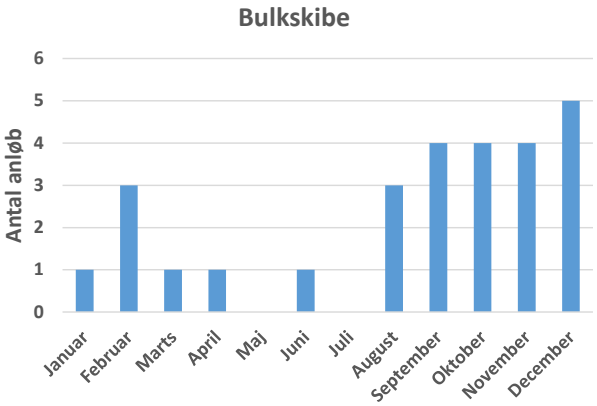
Filen indeholder oplysninger om anløb i de fem havne i årene 2015-2019.

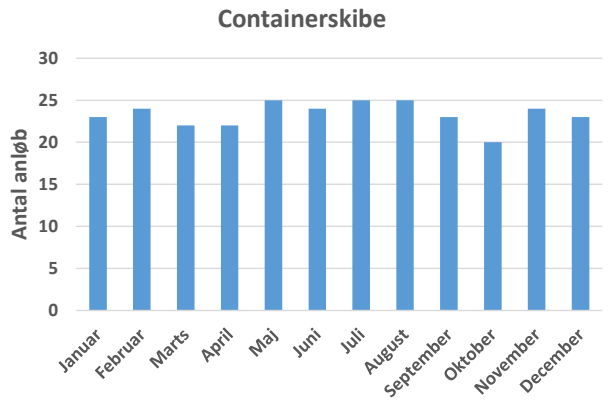
For hvert anløb er der oplysninger om: Havn, år, kajområde, kajnummer, skibsnavn, IMO kode, ankomsttidspunkt, afsejlingstidspunkt.

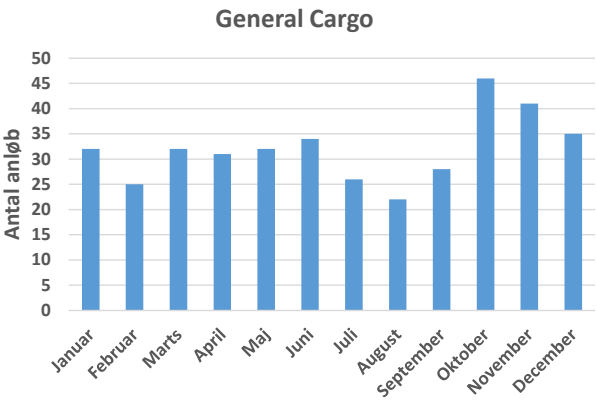
Filen indeholder tre underark: Anløbsliste krydstogtskibe, Anløbsliste andre skibe Kbh, Anløbsliste andre skibe Aarhus.

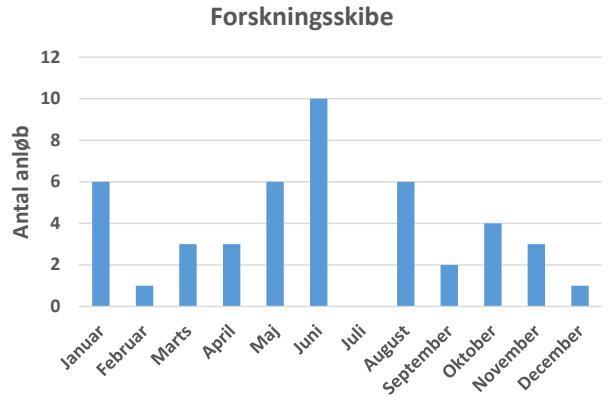
Bilag 2 Anløb og emissioner pr. mdr.

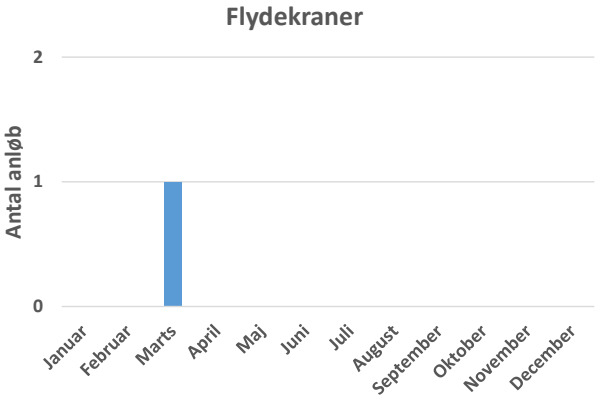


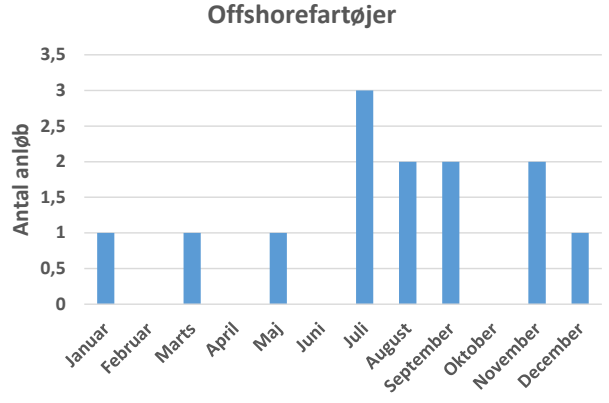


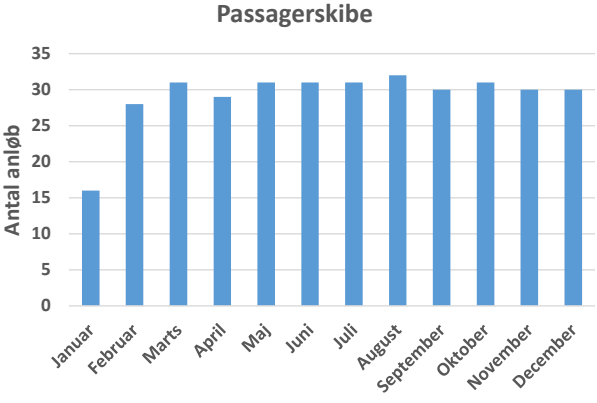


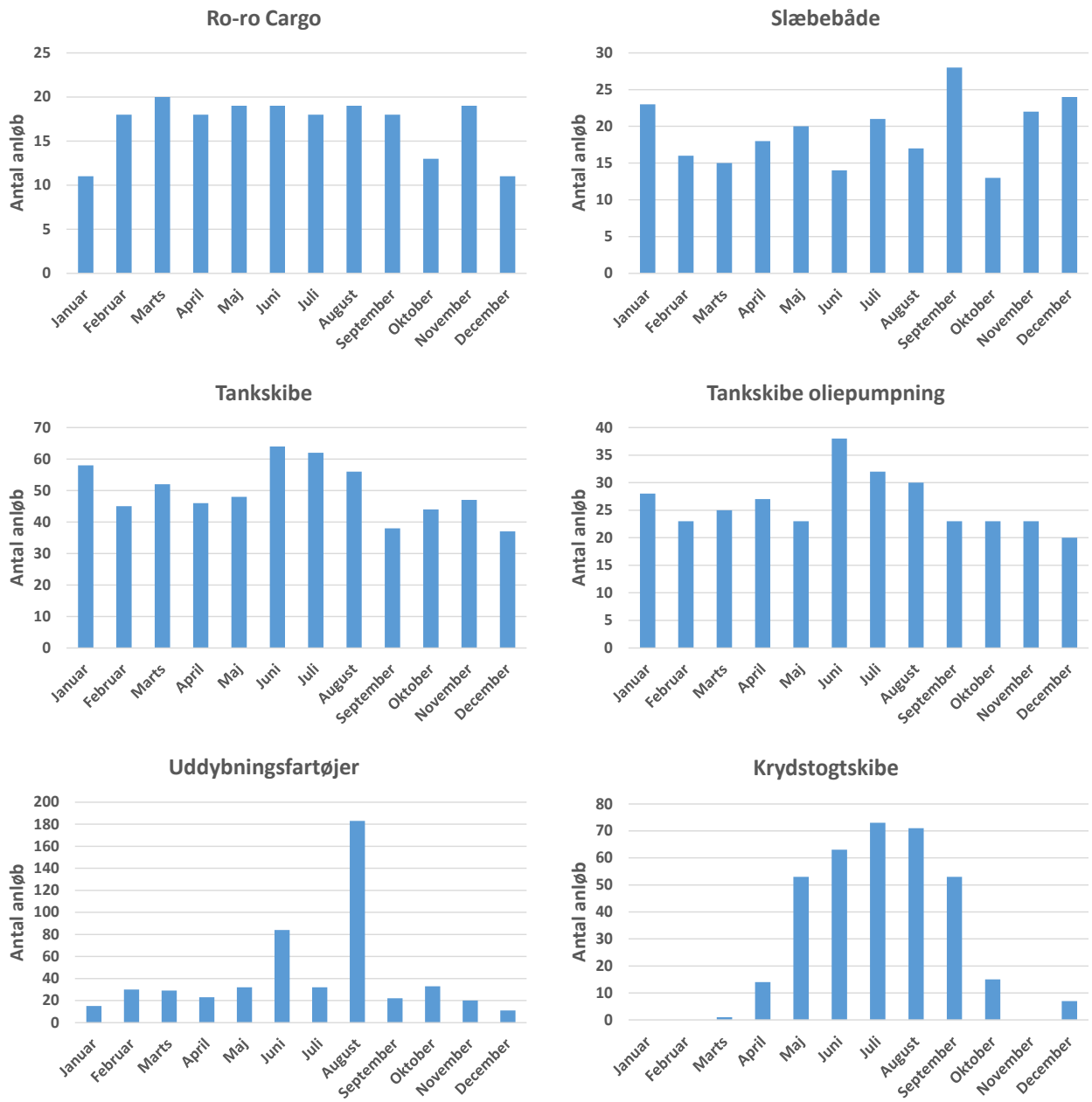




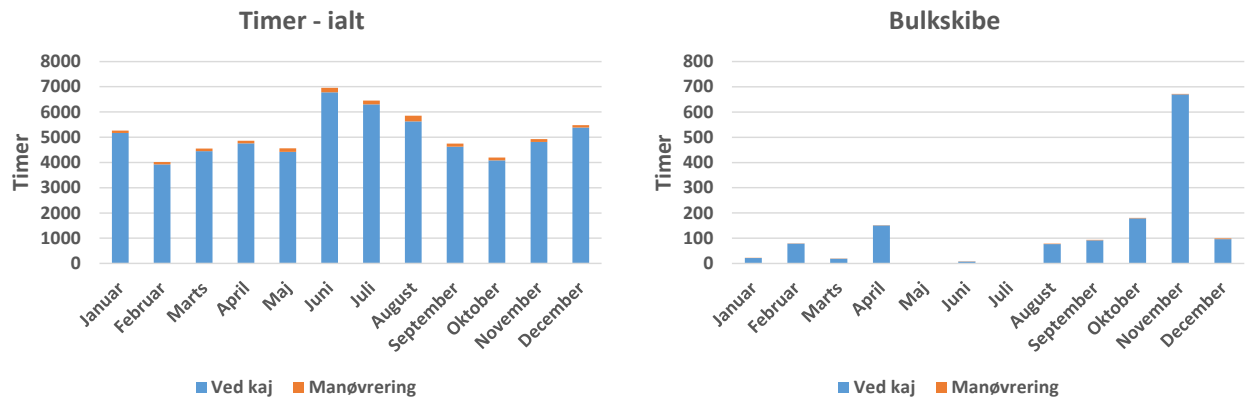


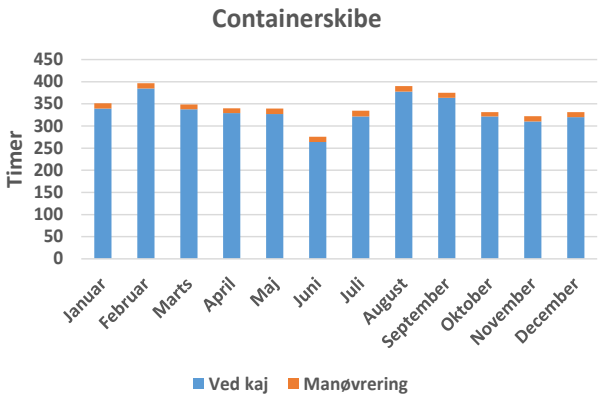


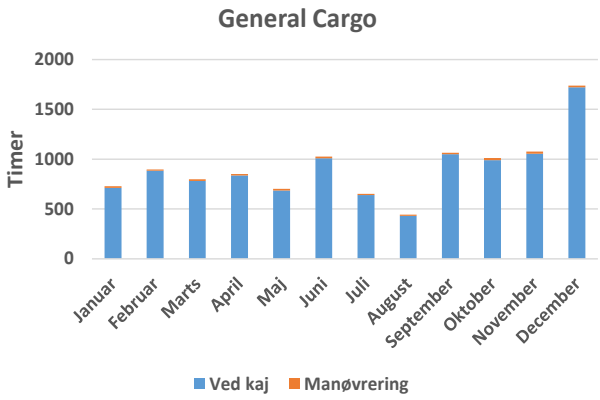


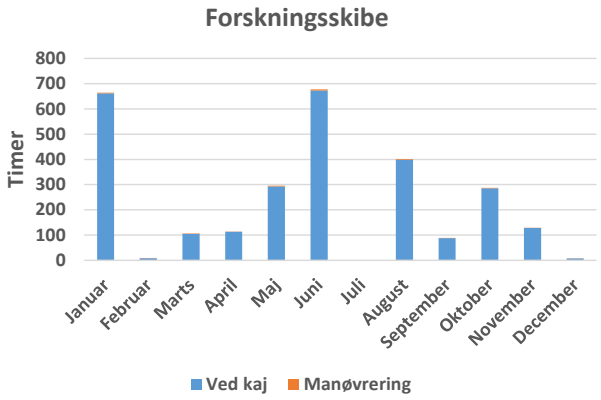


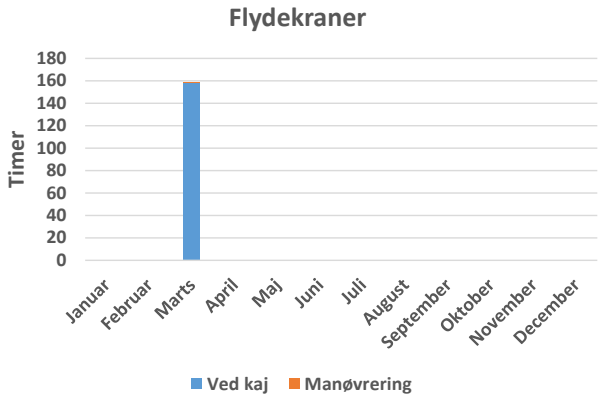
Figur B2.1. Antallet af anløb af skibe (i alt og vigtigste skibstyper) i Københavns Havn i 2019 fordelt pr. skibstype og måned.

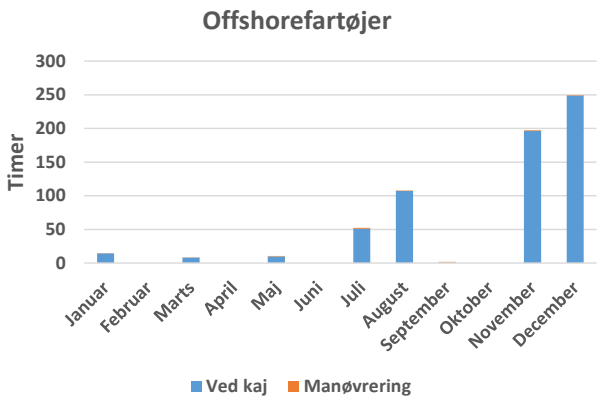


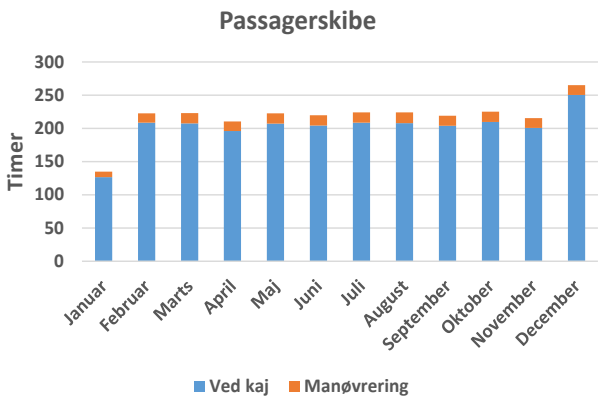

Containerskibe
Timer
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

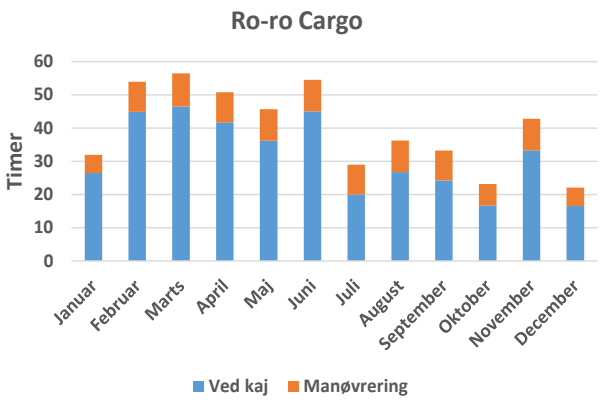

General Cargo
Timer
2000
1500
1000
500
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

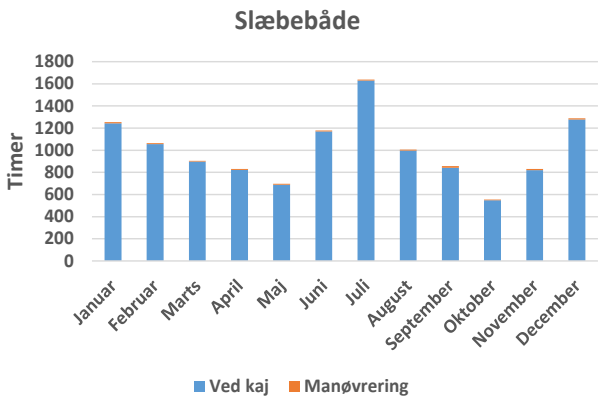

Forskningsskibe
Timer
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

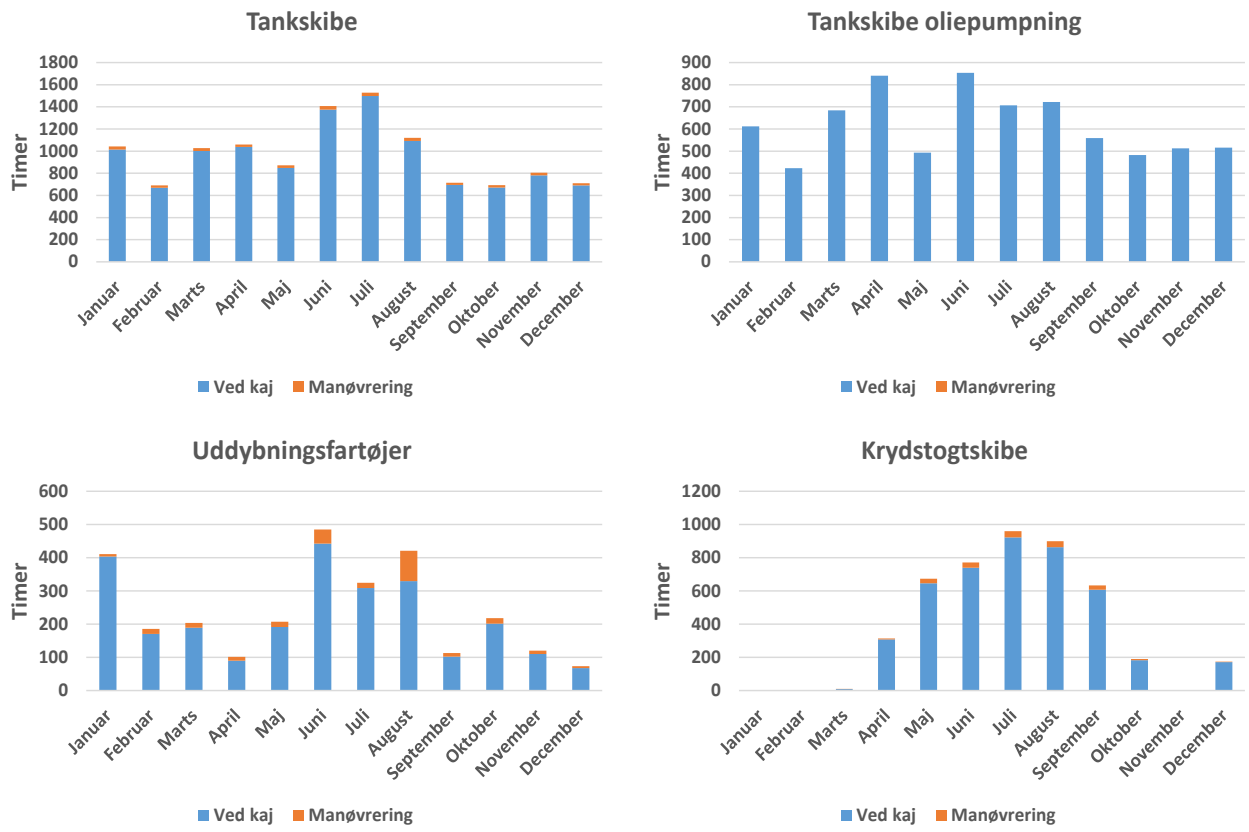

Flydekraner
Timer
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering


Offshorefartøjer
Timer
300
250
200
150
100
50
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

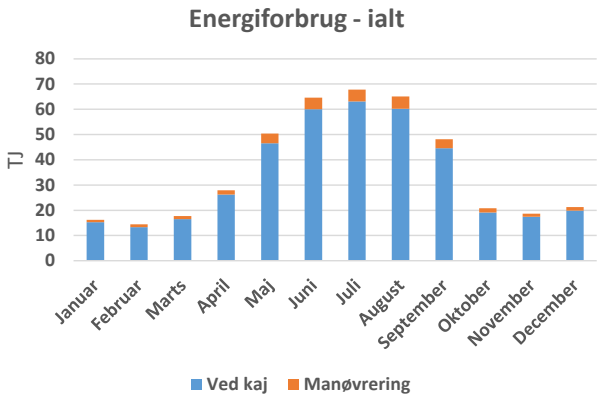

Passagerskibe
Timer
300
250
200
150
100
50
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

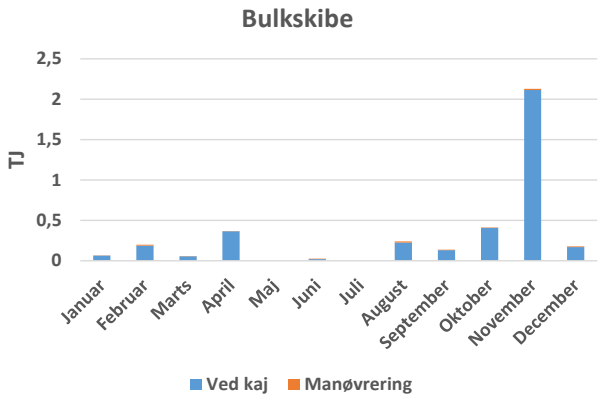

Ro-ro Cargo
Timer
60
50
40
30
20
10
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

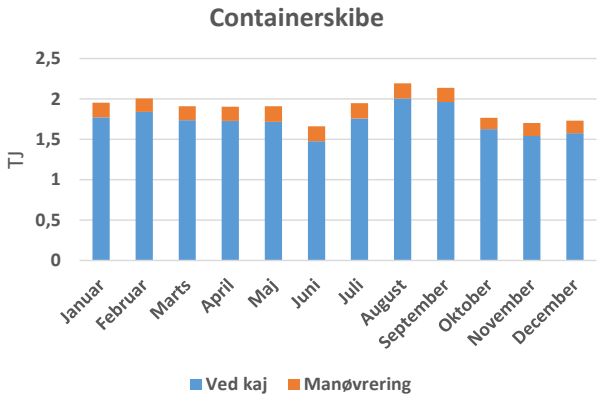

Slæbebåde
Timer
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

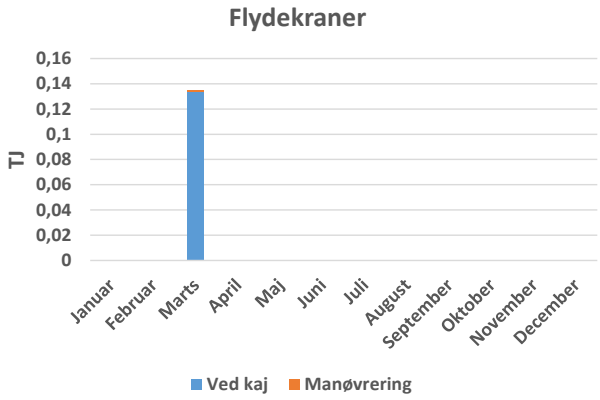


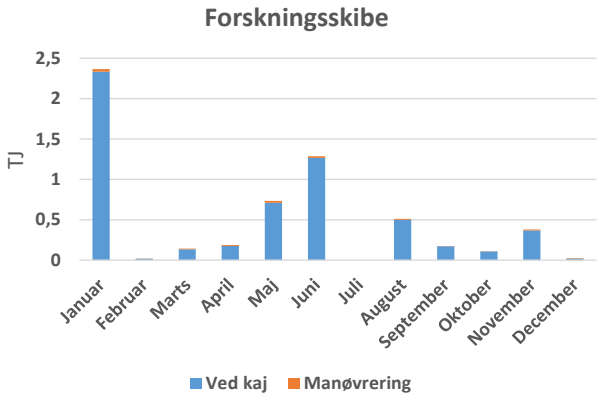
Figur B2.2. Antal timer i alt for vigtigste skibstyper i Københavns Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).

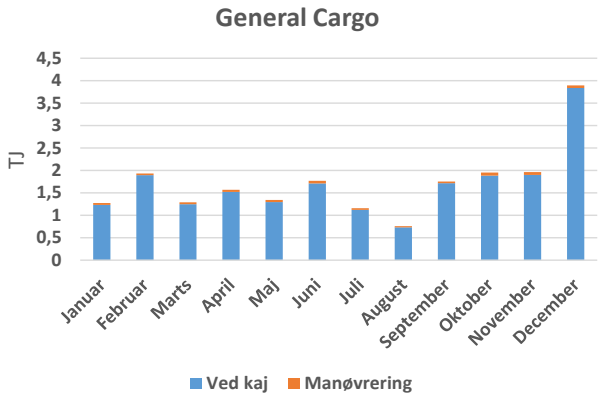

Energiforbrug - ialt
TJ
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

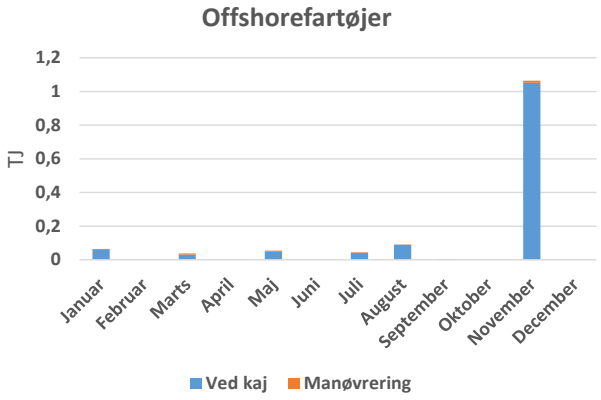

Bulkskibe
TJ
2,5
2
1,5
1
0,5
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

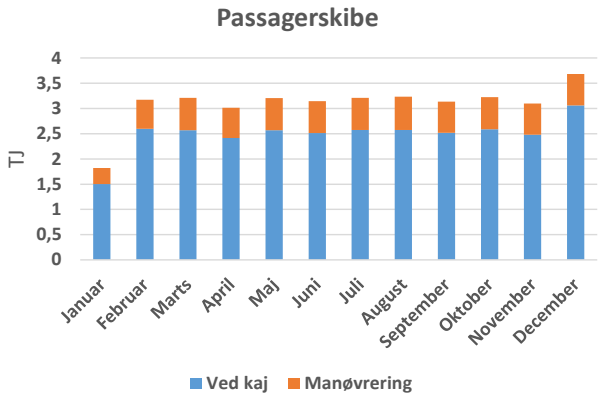

Containerskibe
TJ
2,5
2
1,5
1
0,5
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

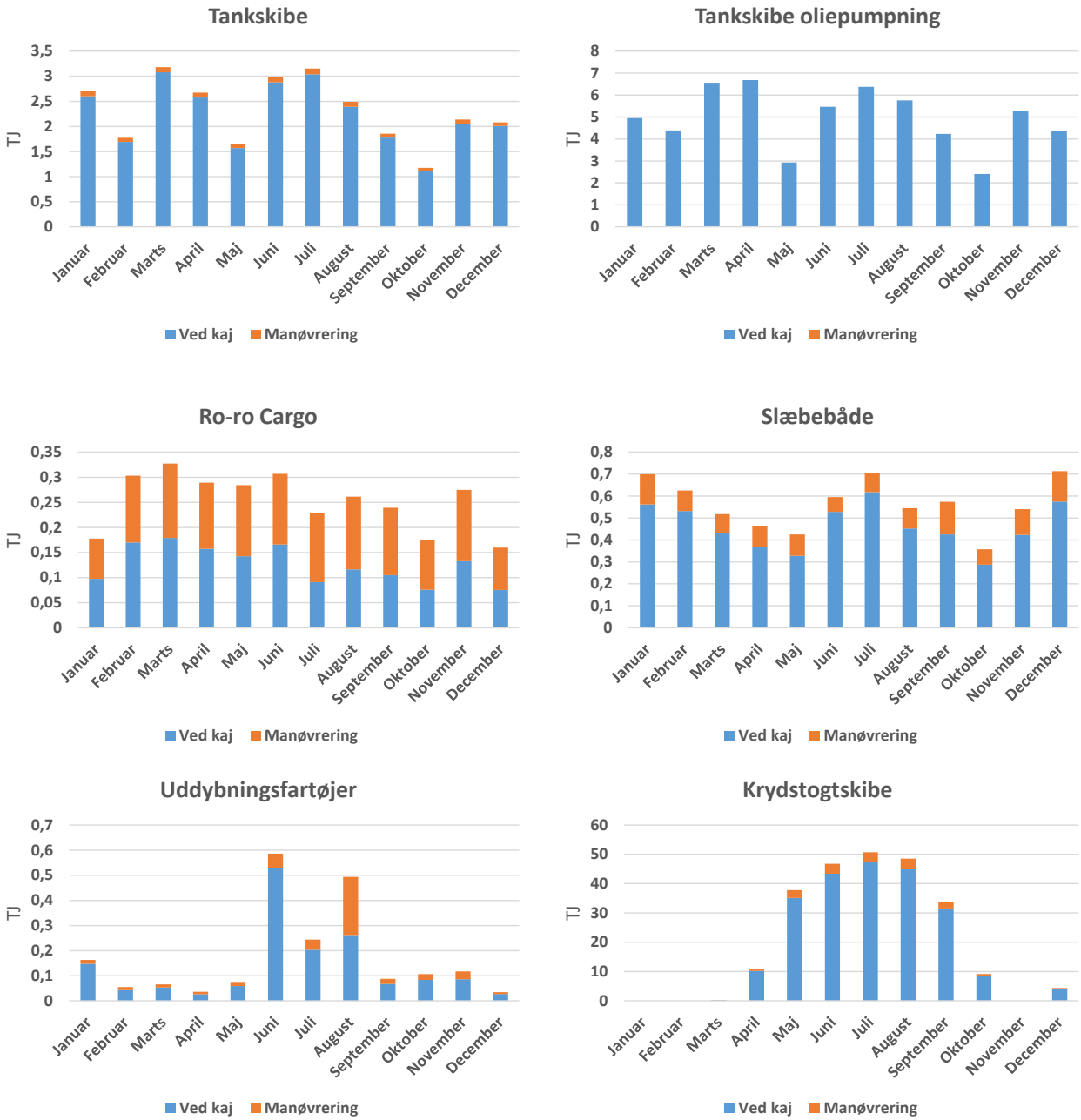

Flydekraner
TJ
0,16
0,14
0,12
0,1
0,08
0,06
0,04
0,02
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering


Forskningsskibe
TJ
2,5
2
1,5
1
0,5
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

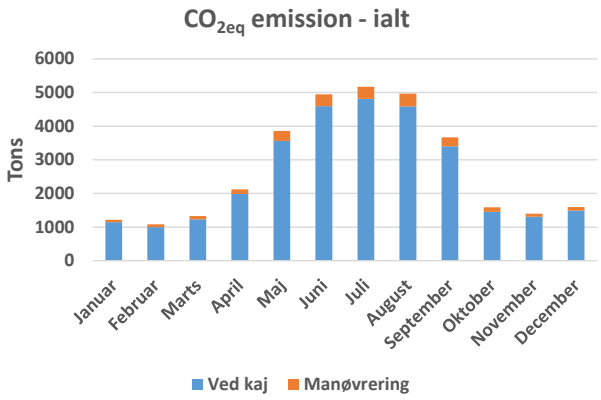

General Cargo
TJ
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

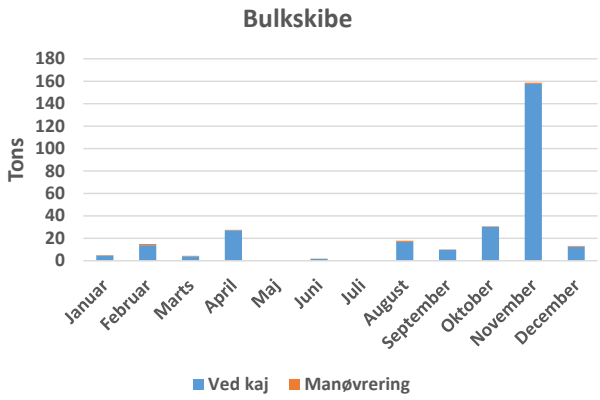

Offshorefartøjer
TJ
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

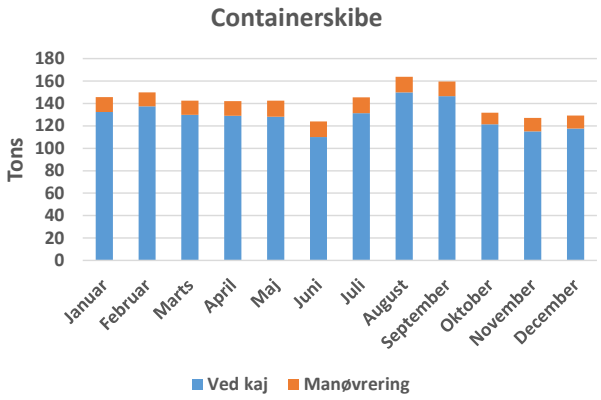

Passagerskibe
TJ
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

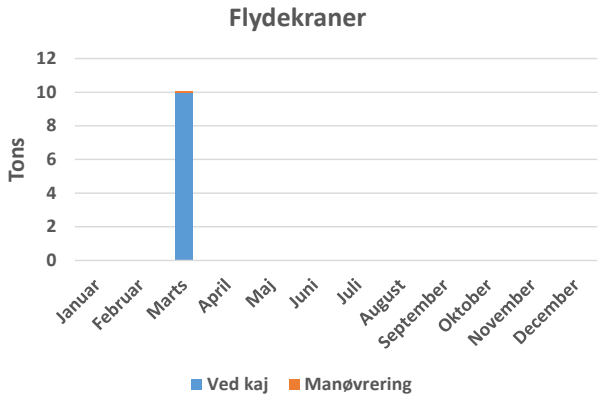


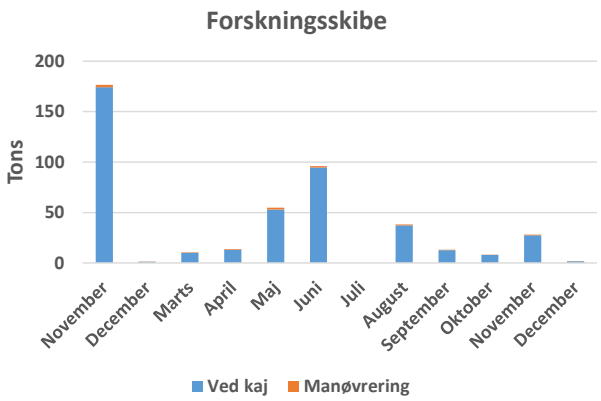
Figur B2.3. Energiforbrug i alt for vigtigste skibstyper i Københavns Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).

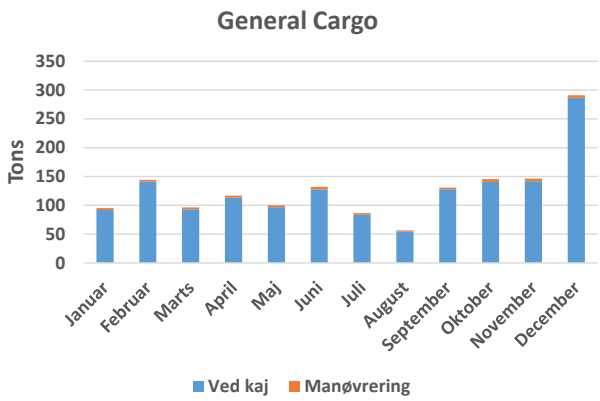

CO_{2eq} emission - ialt
Tons
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

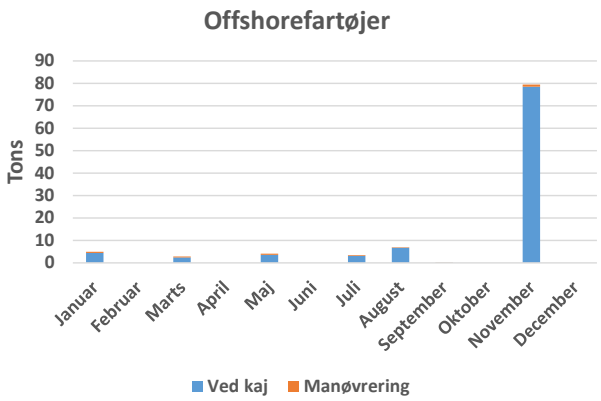

Bulkskibe
Tons
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

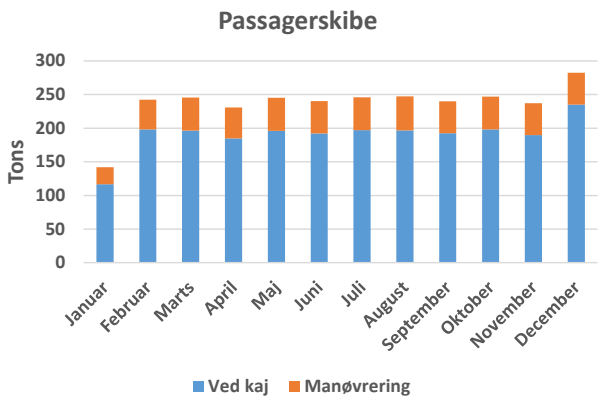

Containerskibe
Tons
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

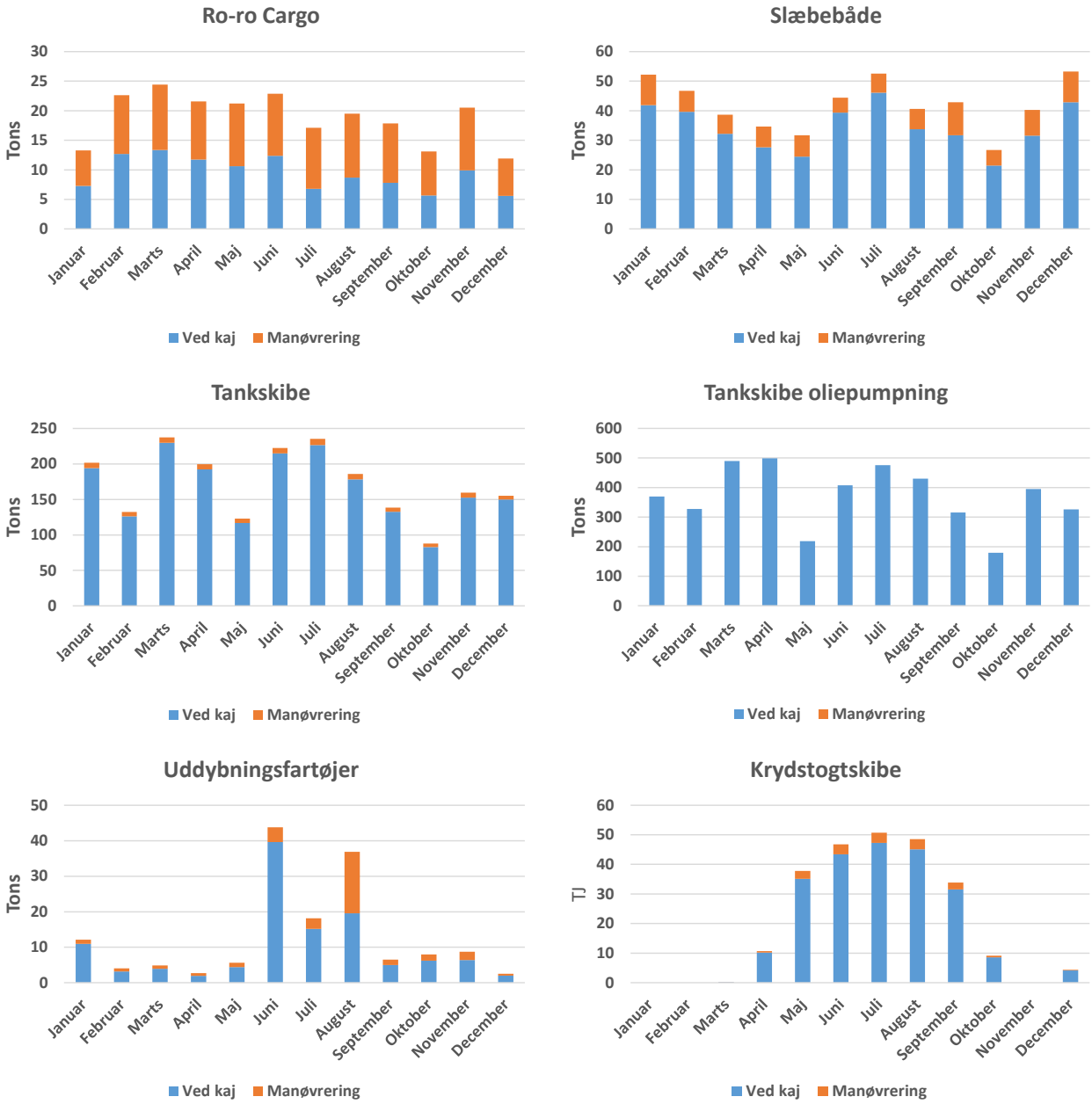

Flydekraner
Tons
12
10
8
6
4
2
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering


Forskningsskibe
Tons
200
150
100
50
0
November
December
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

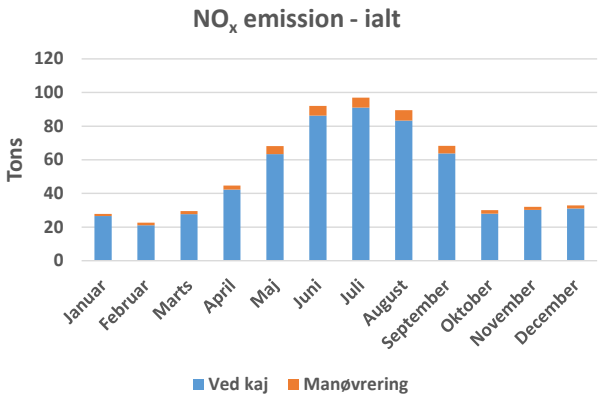

General Cargo
Tons
350
300
250
200
150
100
50
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

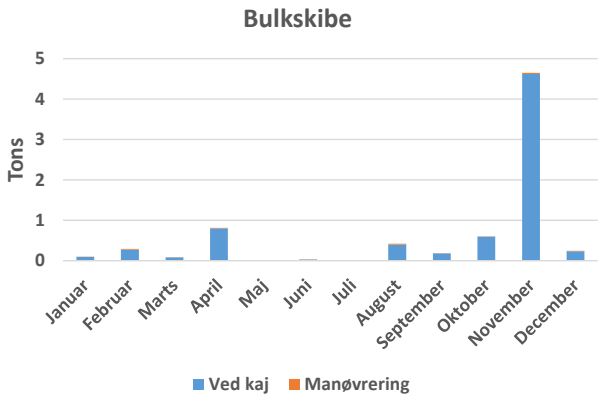

Offshorefartøjer
Tons
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

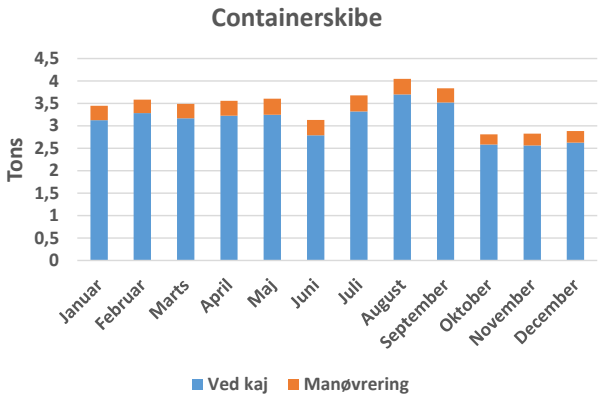

Passagerskibe
Tons
300
250
200
150
100
50
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

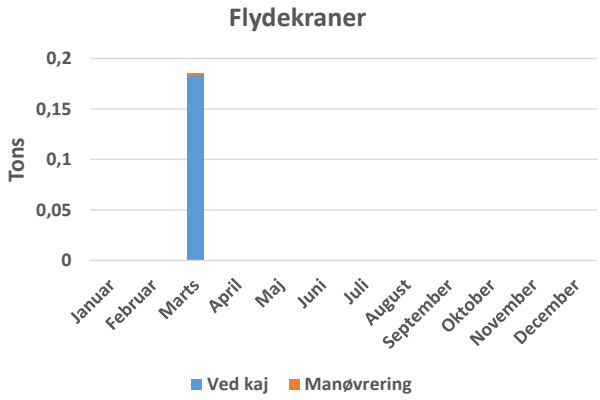


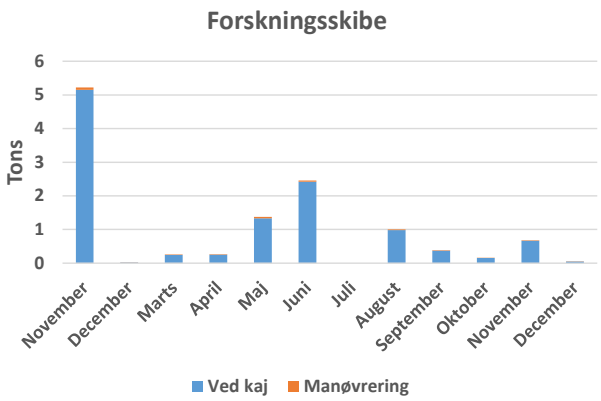
Figur B2.4. CO_{2eq}-emissioner i alt for vigtigste skibstyper i Københavns Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).

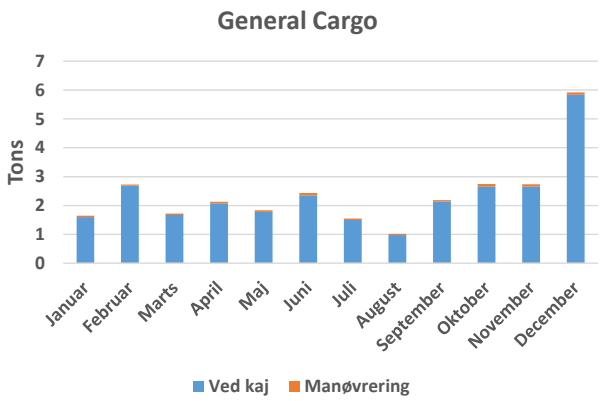

NO_x emission - ialt
Tons
120
100
80
60
40
20
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

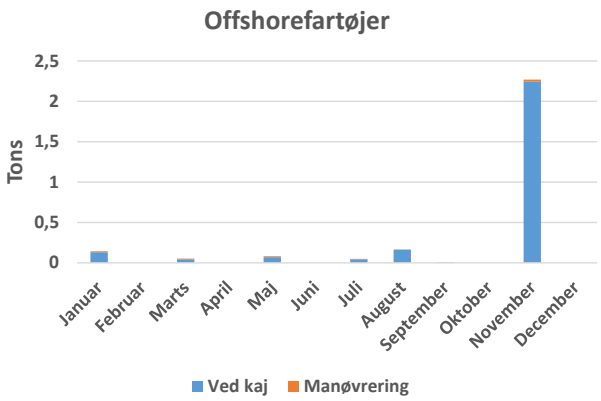

Bulkskibe
Tons
5
4
3
2
1
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

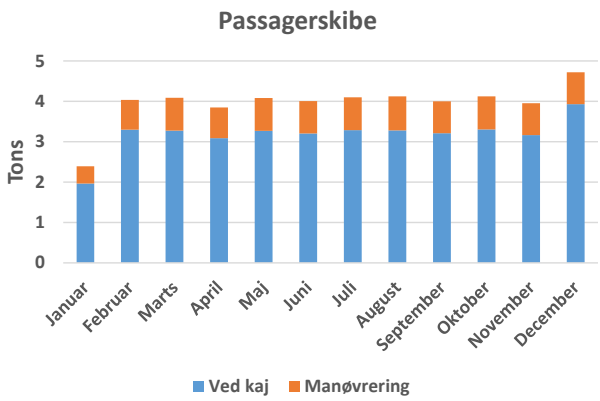

Containerskibe
Tons
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

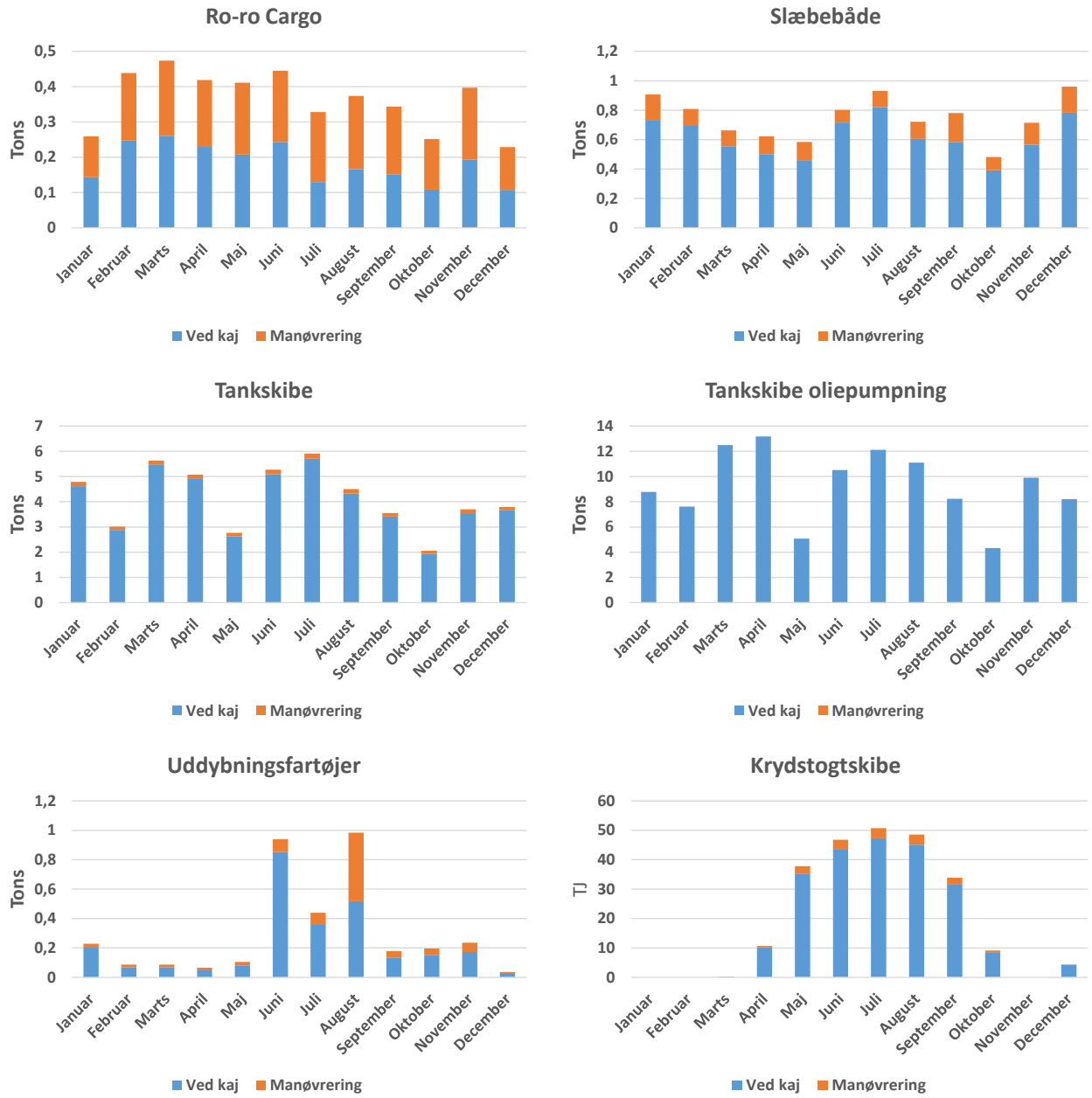

Flydekraner
Tons
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering


Forskningsskibe
Tons
6
5
4
3
2
1
0
November
December
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

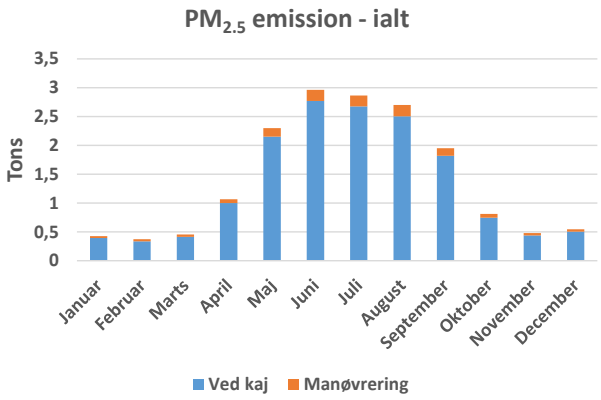

General Cargo
Tons
7
6
5
4
3
2
1
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

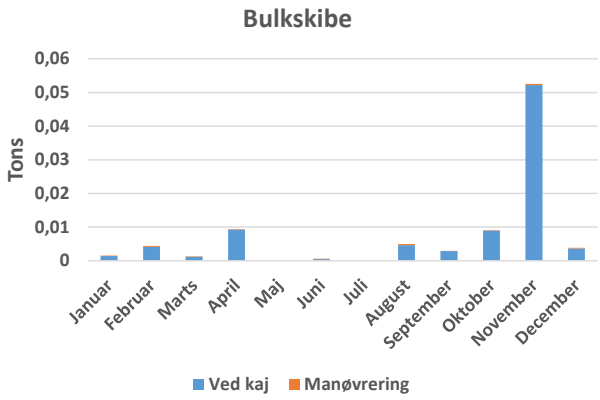

Offshorefartøjer
Tons
2,5
2
1,5
1
0,5
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

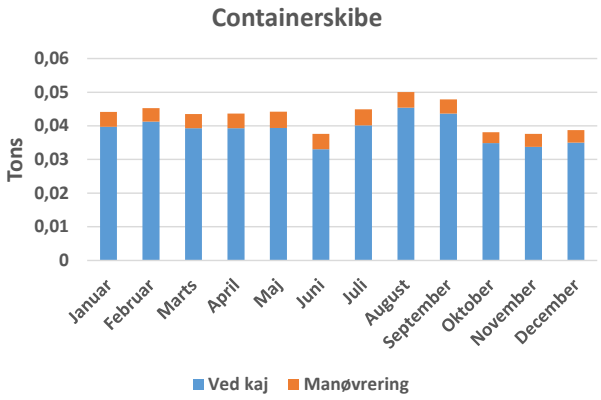

Passagerskibe
Tons
5
4
3
2
1
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

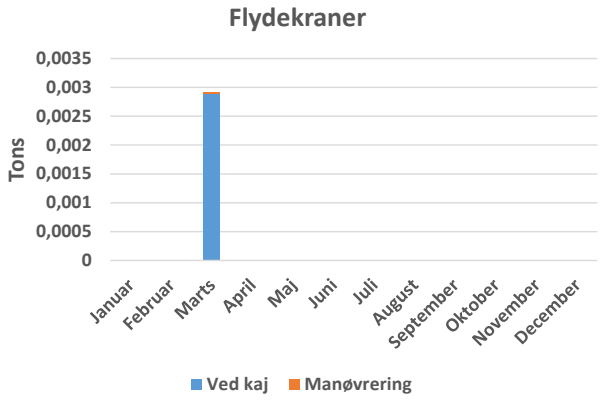


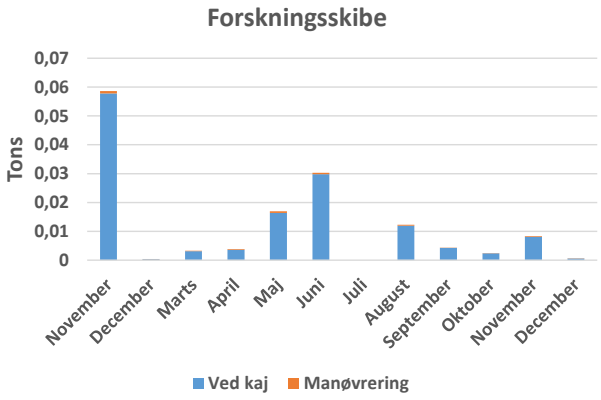
Figur B2.5. NO_x-emissioner i alt for vigtigste skibstyper i Københavns Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).

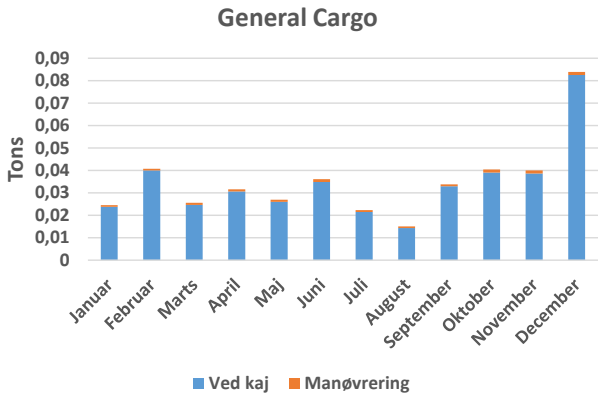

PM2.5 emission - ialt
Tons
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

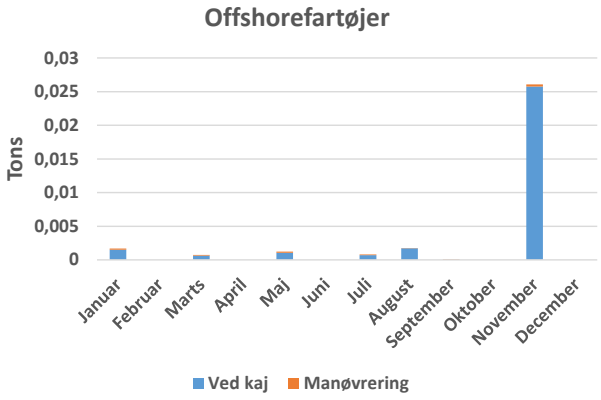

Bulkskibe
Tons
0,06
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

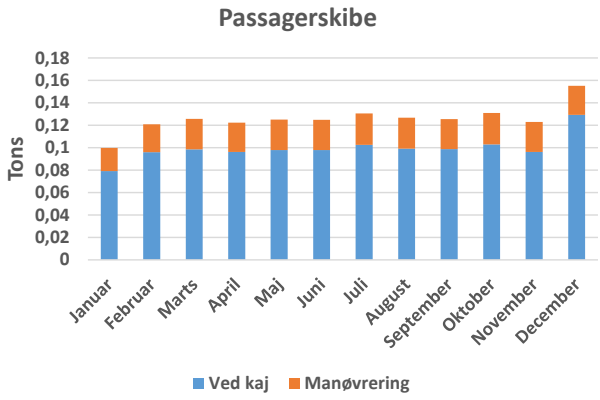

Containerskibe
Tons
0,06
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

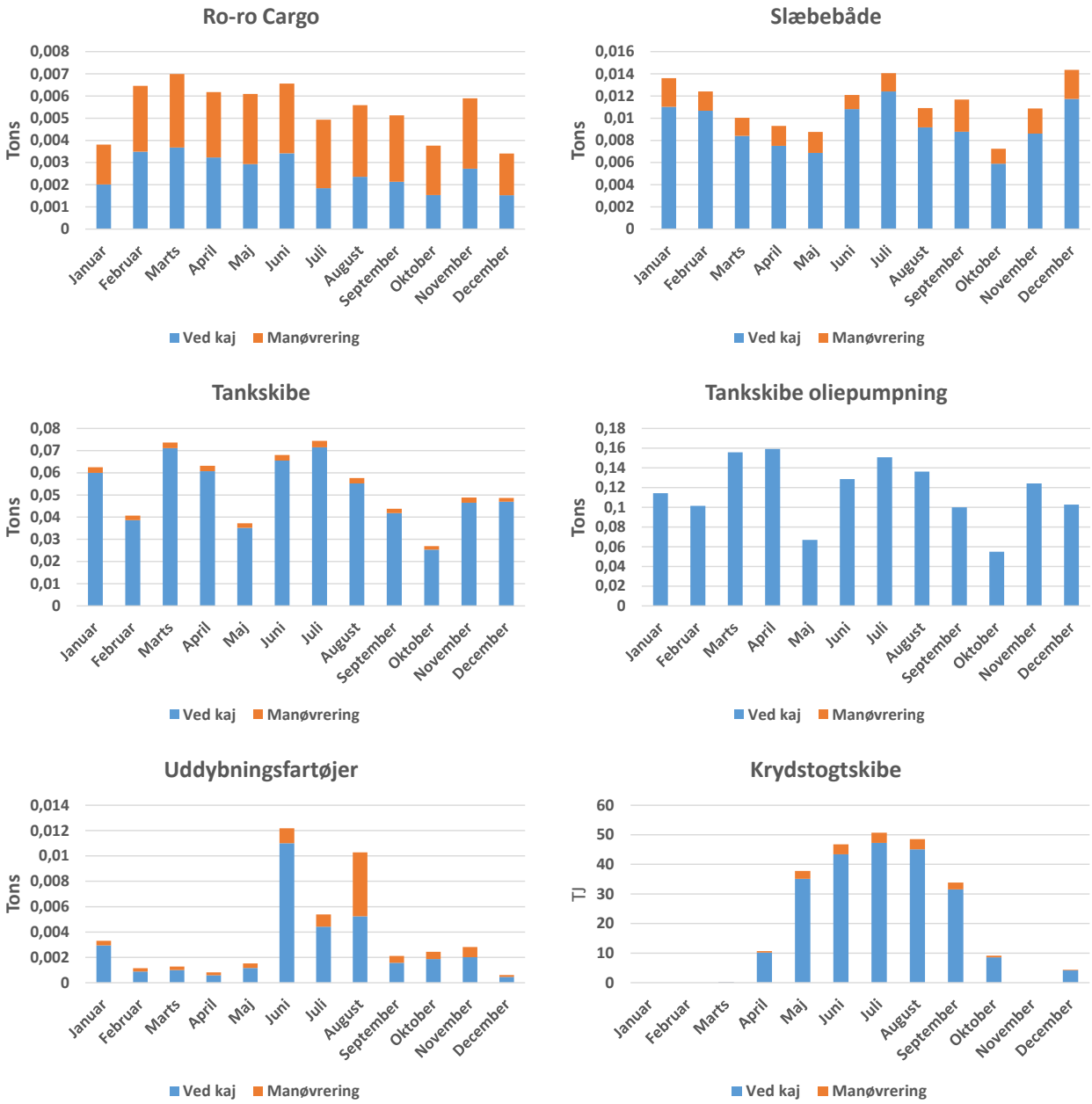

Flydekraner
Tons
0,0035
0,003
0,0025
0,002
0,0015
0,001
0,0005
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering


Forskningsskibe
Tons
0,07
0,06
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
0
November
December
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

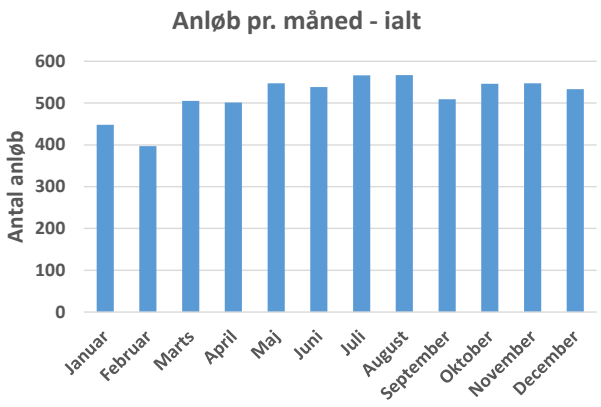

General Cargo
Tons
0,09
0,08
0,07
0,06
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

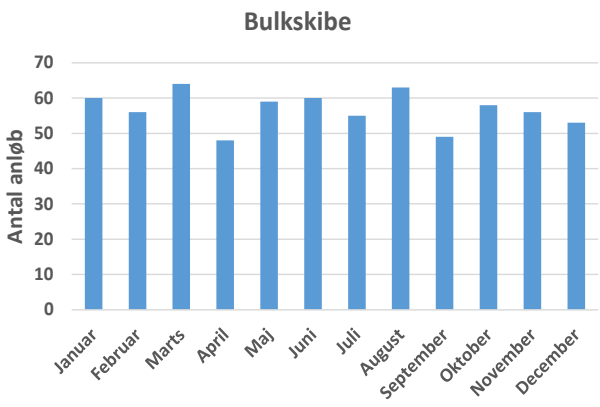

Offshorefartøjer
Tons
0,03
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

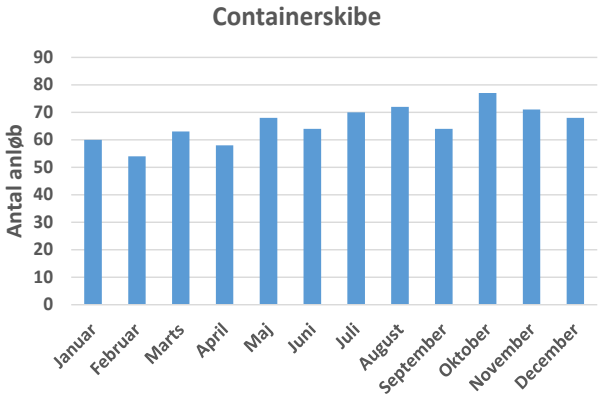

Passagerskibe
Tons
0,18
0,16
0,14
0,12
0,1
0,08
0,06
0,04
0,02
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

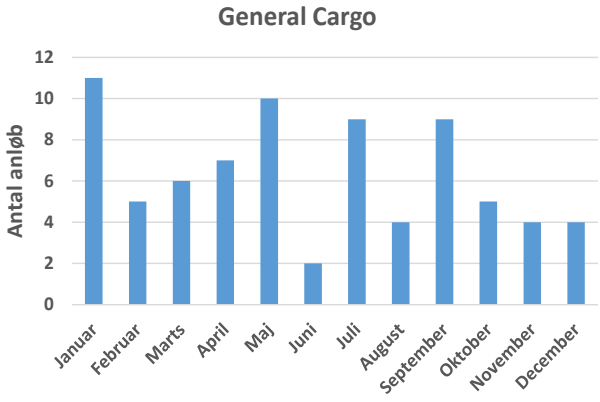


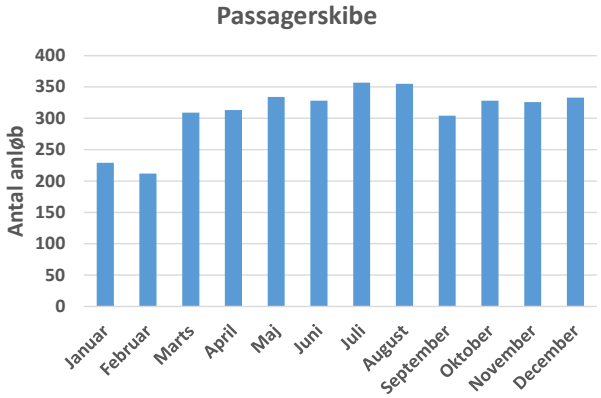
Figur B2.6. $PM_{2.5}$-emissioner i alt for vigtigste skibstyper i Københavns Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).

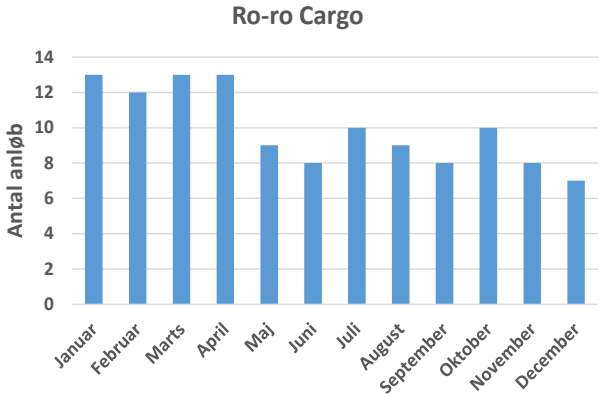

Anløb pr. måned - ialt
Antal anløb
0
100
200
300
400
500
600
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December

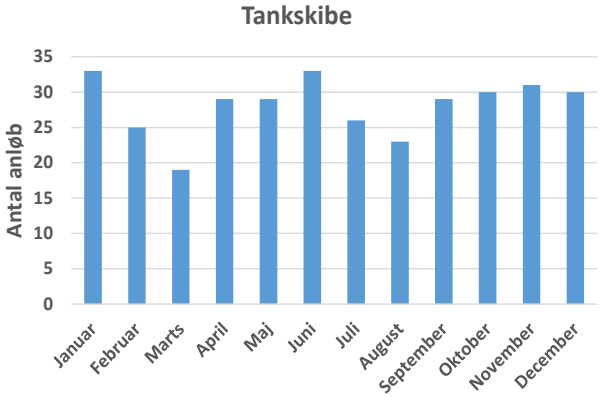

Bulkskibe
Antal anløb
0
10
20
30
40
50
60
70
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December

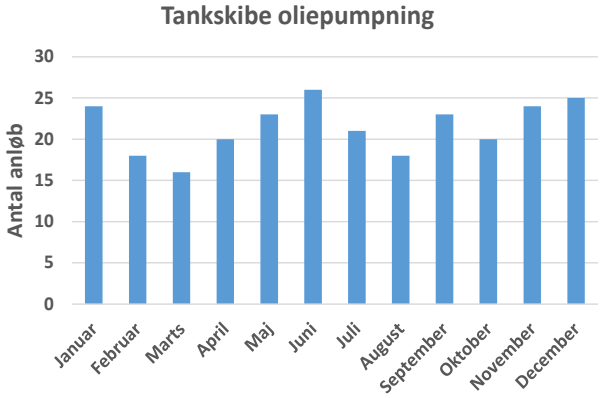

Containerskibe
Antal anløb
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December

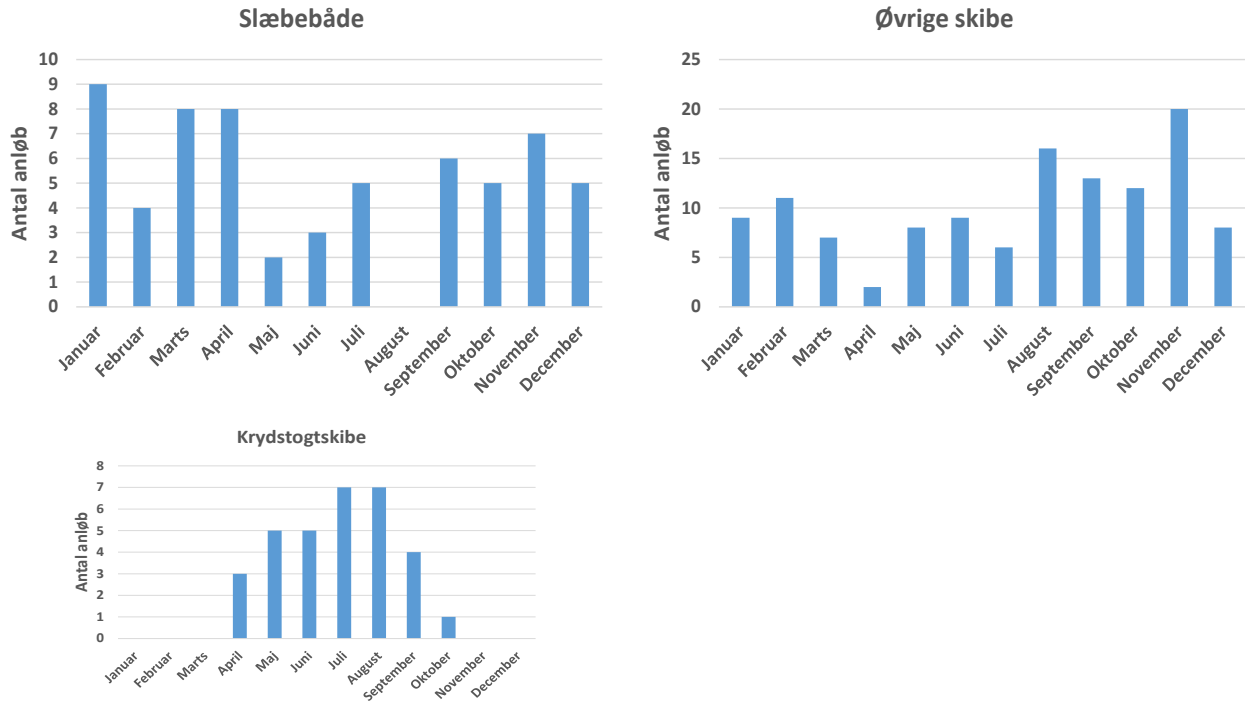

General Cargo
Antal anløb
0
2
4
6
8
10
12
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December


Passagerskibe
Antal anløb
0
50
100
150
200
250
300
350
400
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December

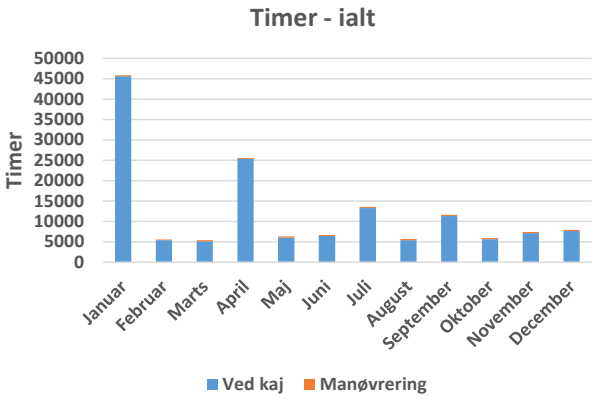

Ro-ro Cargo
Antal anløb
0
2
4
6
8
10
12
14
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December

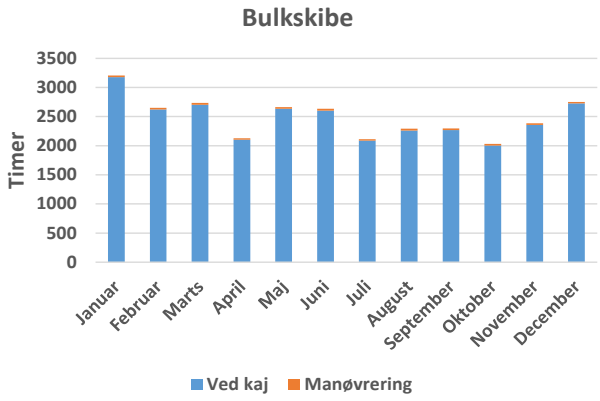

Tankskibe
Antal anløb
0
5
10
15
20
25
30
35
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December

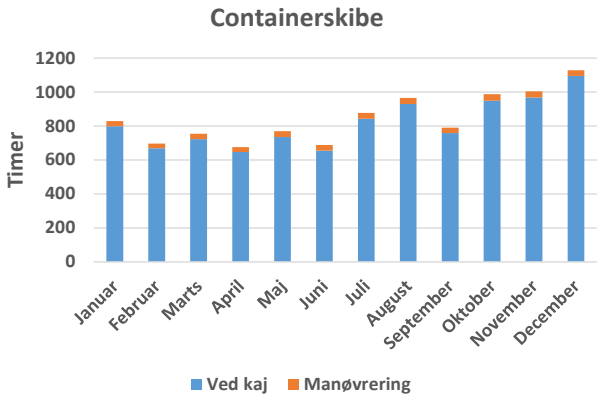

Tankskibe oliepumpning
Antal anløb
0
5
10
15
20
25
30
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December

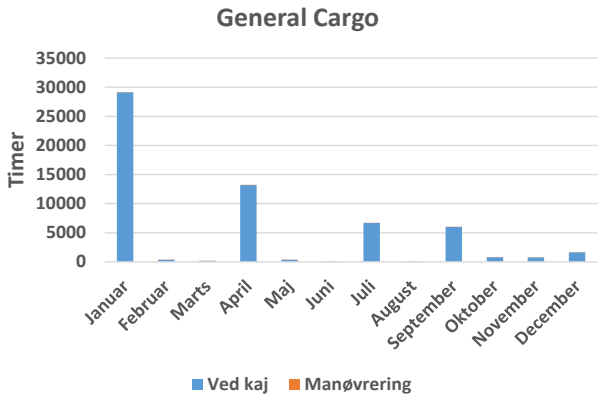


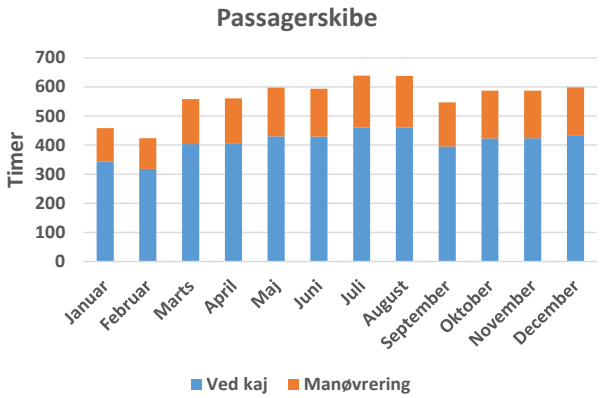
Figur B2.7. Antallet af anløb af skibe i Aarhus Havn i 2019 fordelt pr. skibstype og måned.

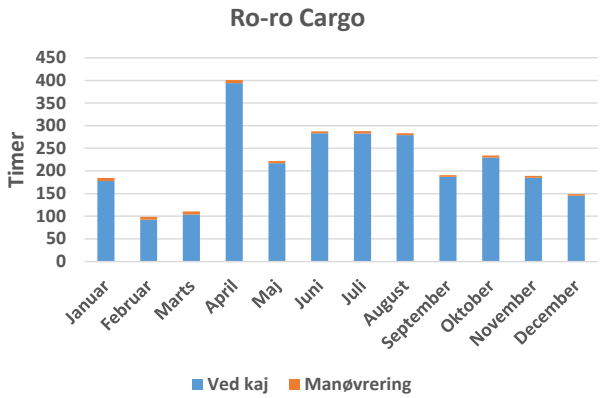

Timer - ialt
Timer
50000
45000
40000
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

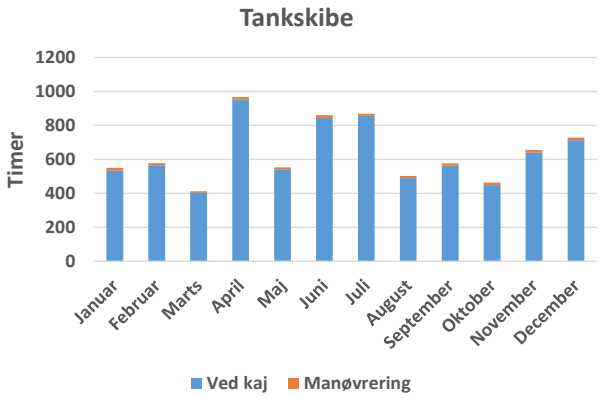

Bulkskibe
Timer
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

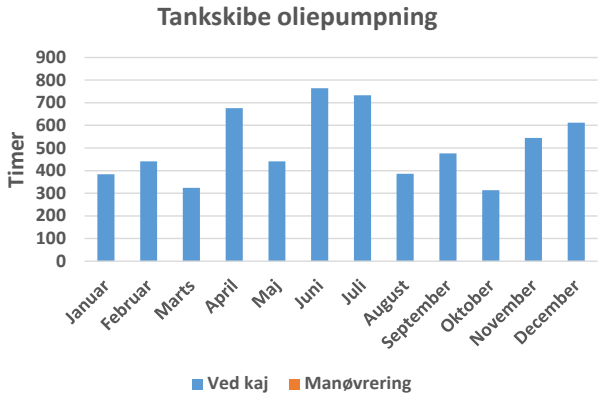

Containerskibe
Timer
1200
1000
800
600
400
200
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

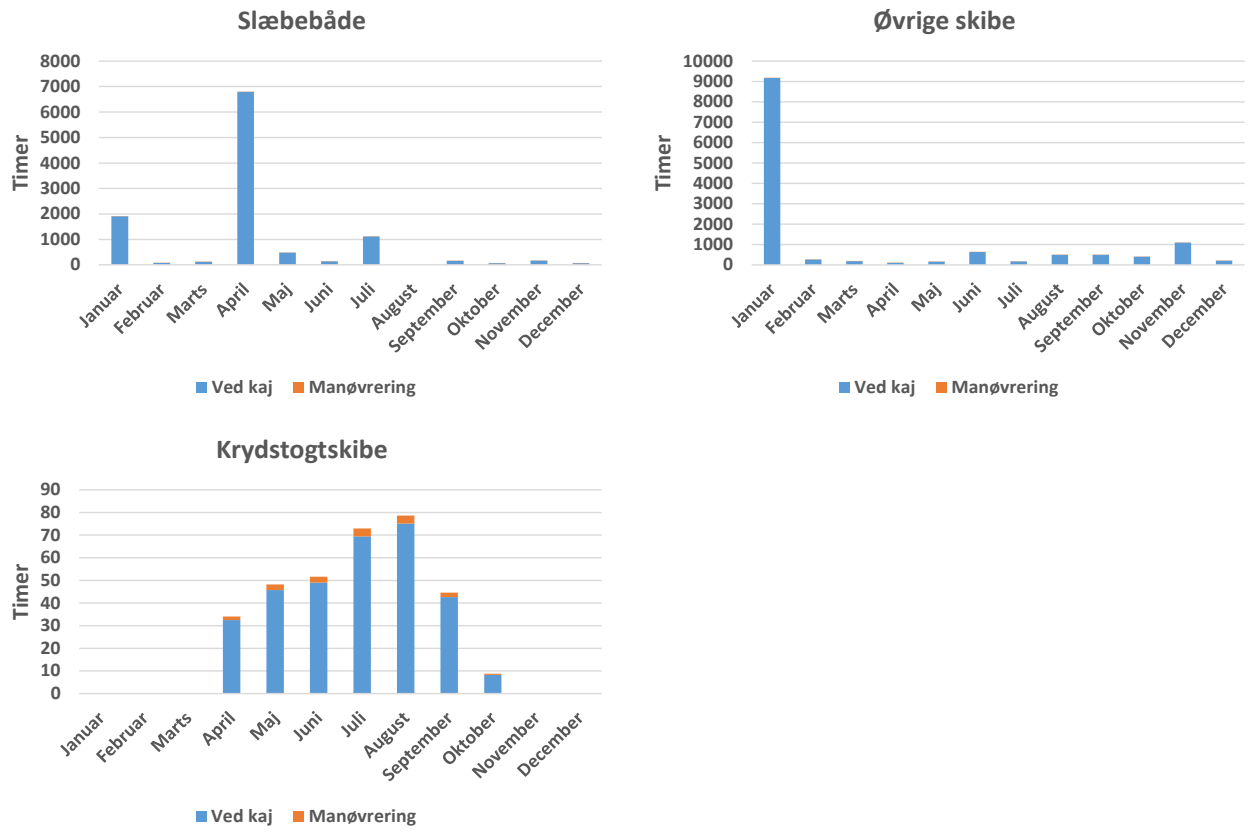

General Cargo
Timer
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering


Passagerskibe
Timer
700
600
500
400
300
200
100
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

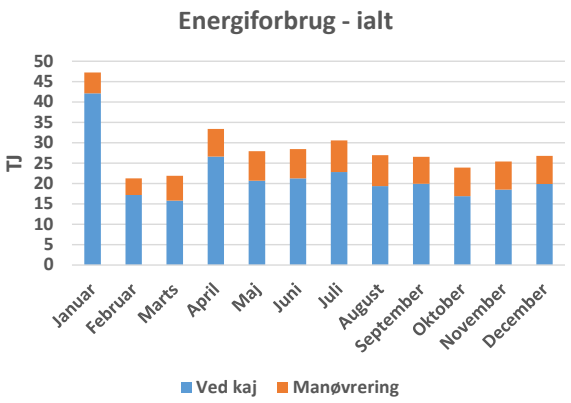

Ro-ro Cargo
Timer
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

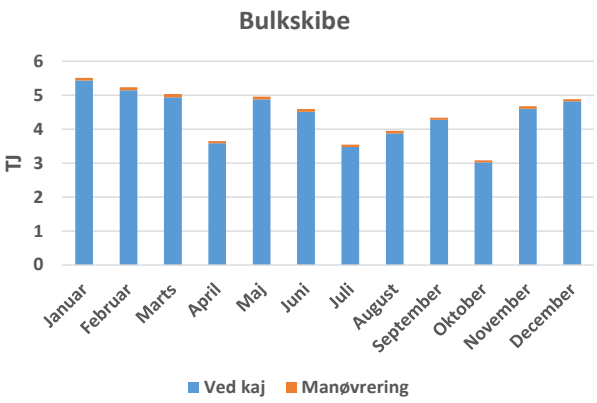

Tankskibe
Timer
1200
1000
800
600
400
200
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

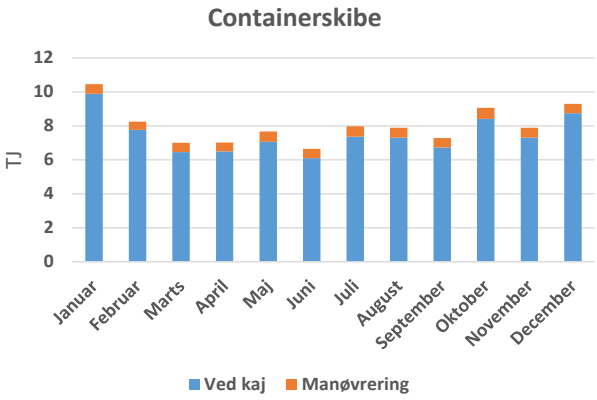

Tankskibe oliepumpning
Timer
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

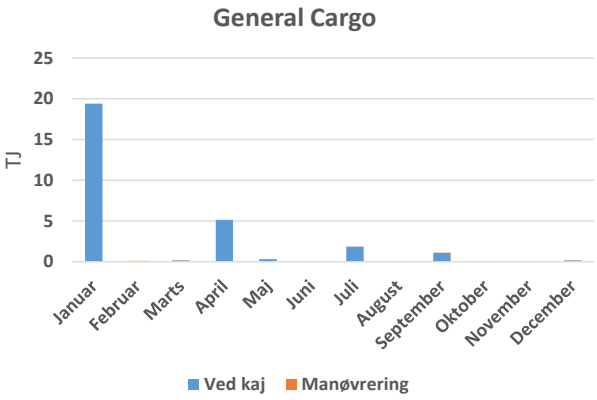


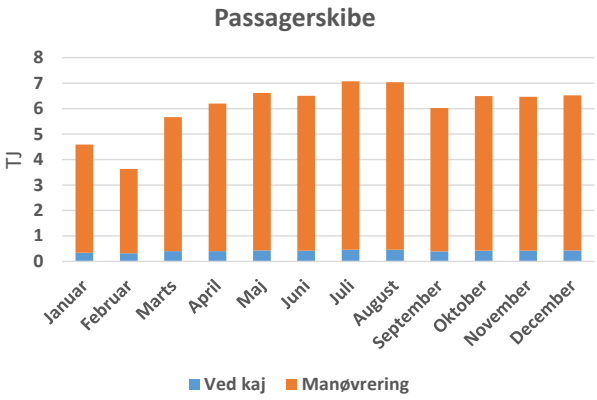
Figur B2.8. Antal timer i alt for vigtigste skibstyper i Aarhus Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).

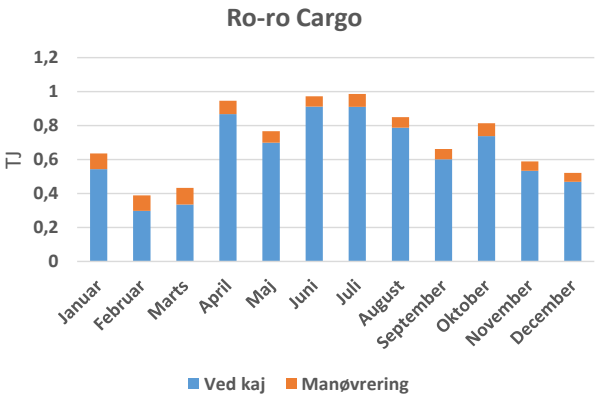

Energiforbrug - ialt
TJ
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

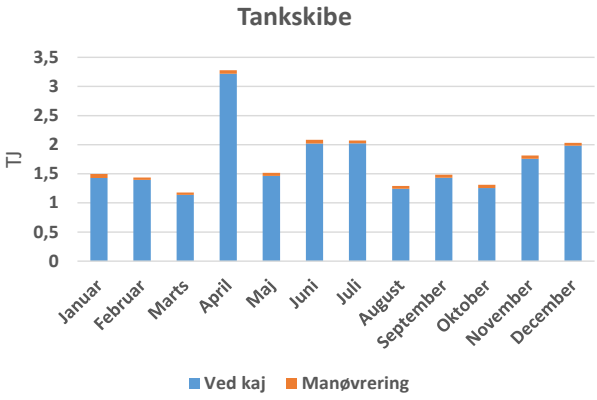

Bulkskibe
TJ
6
5
4
3
2
1
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

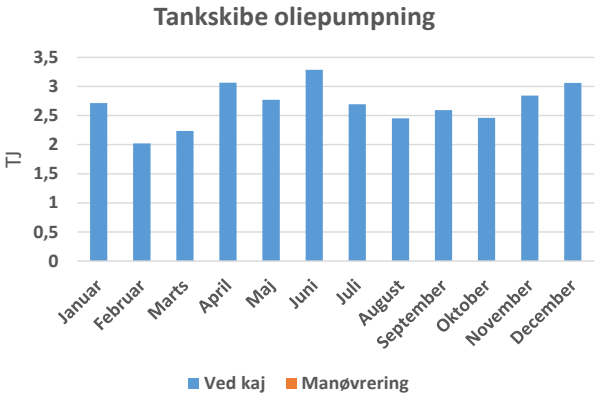

Containerskibe
TJ
12
10
8
6
4
2
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

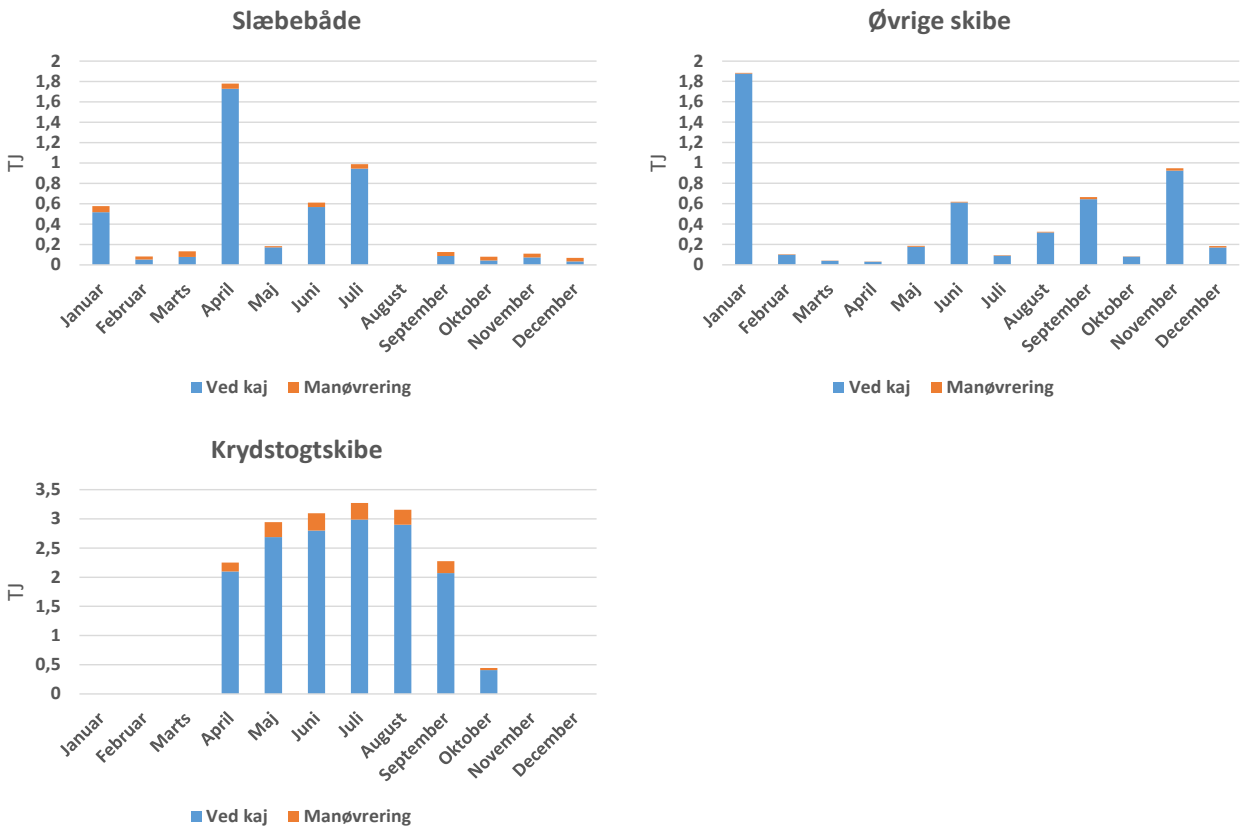

General Cargo
TJ
25
20
15
10
5
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering


Passagerskibe
TJ
8
7
6
5
4
3
2
1
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

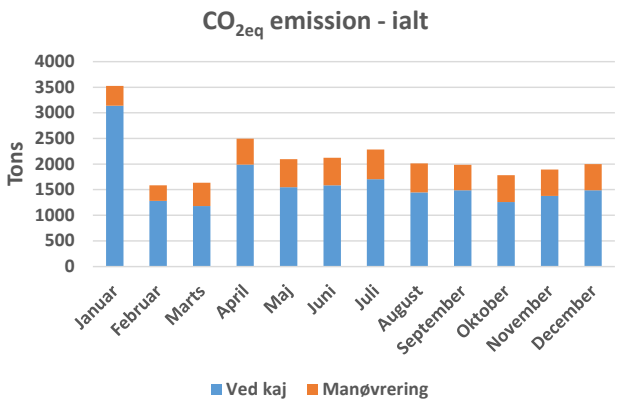

Ro-ro Cargo
TJ
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

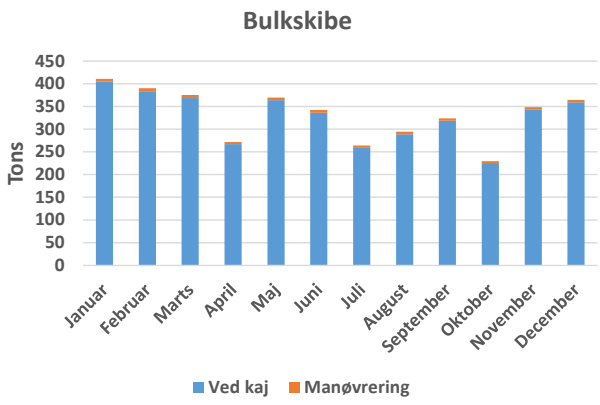

Tankskibe
TJ
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

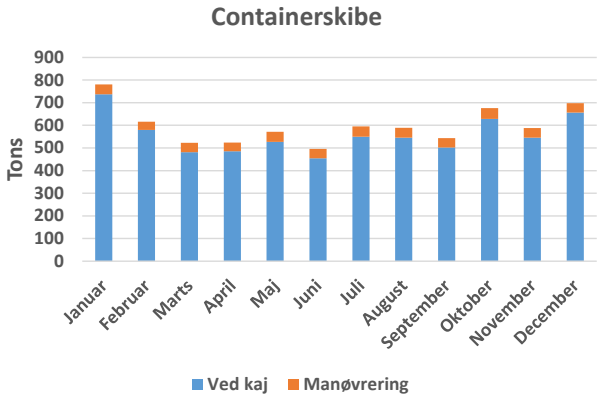

Tankskibe oliepumpning
TJ
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

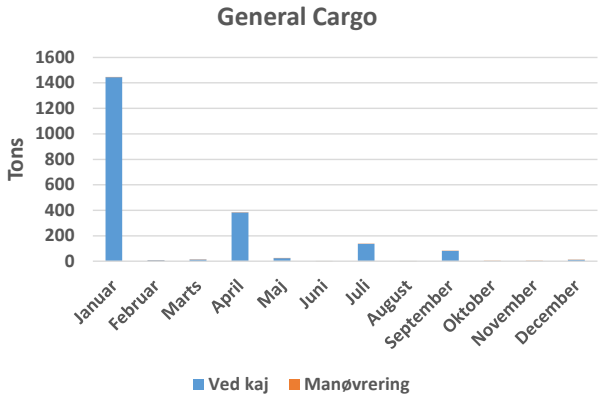


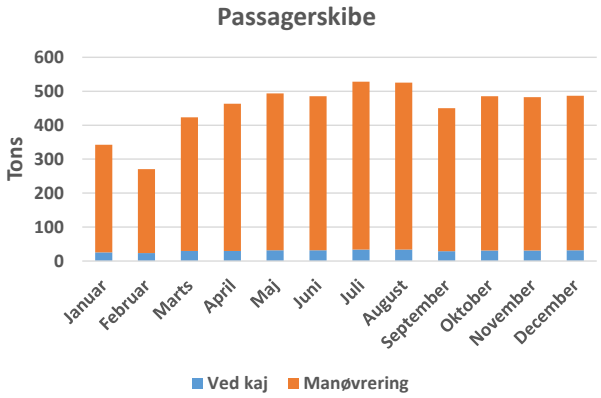
Figur B2.9. Energiforbrug i alt for vigtigste skibstyper i Aarhus Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).

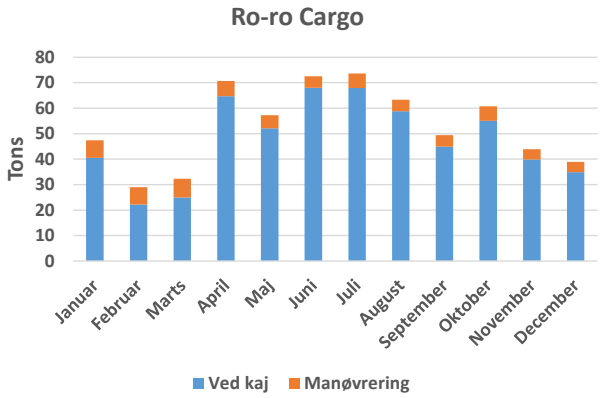

CO_{2eq} emission - ialt
Tons
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

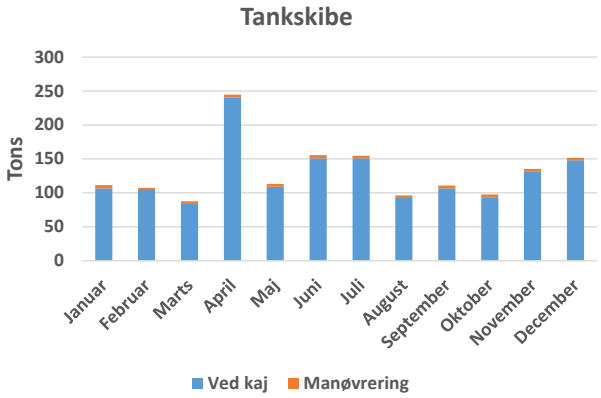

Bulkskibe
Tons
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

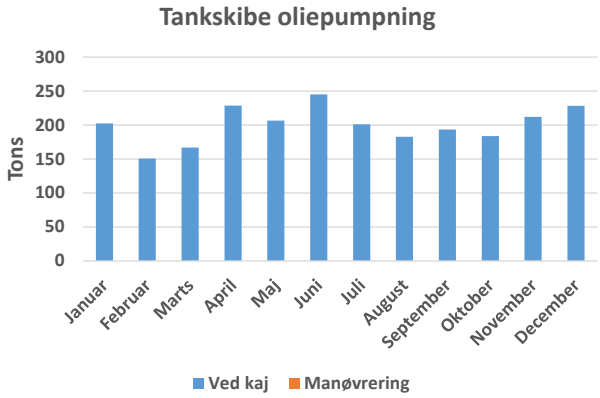

Containerskibe
Tons
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

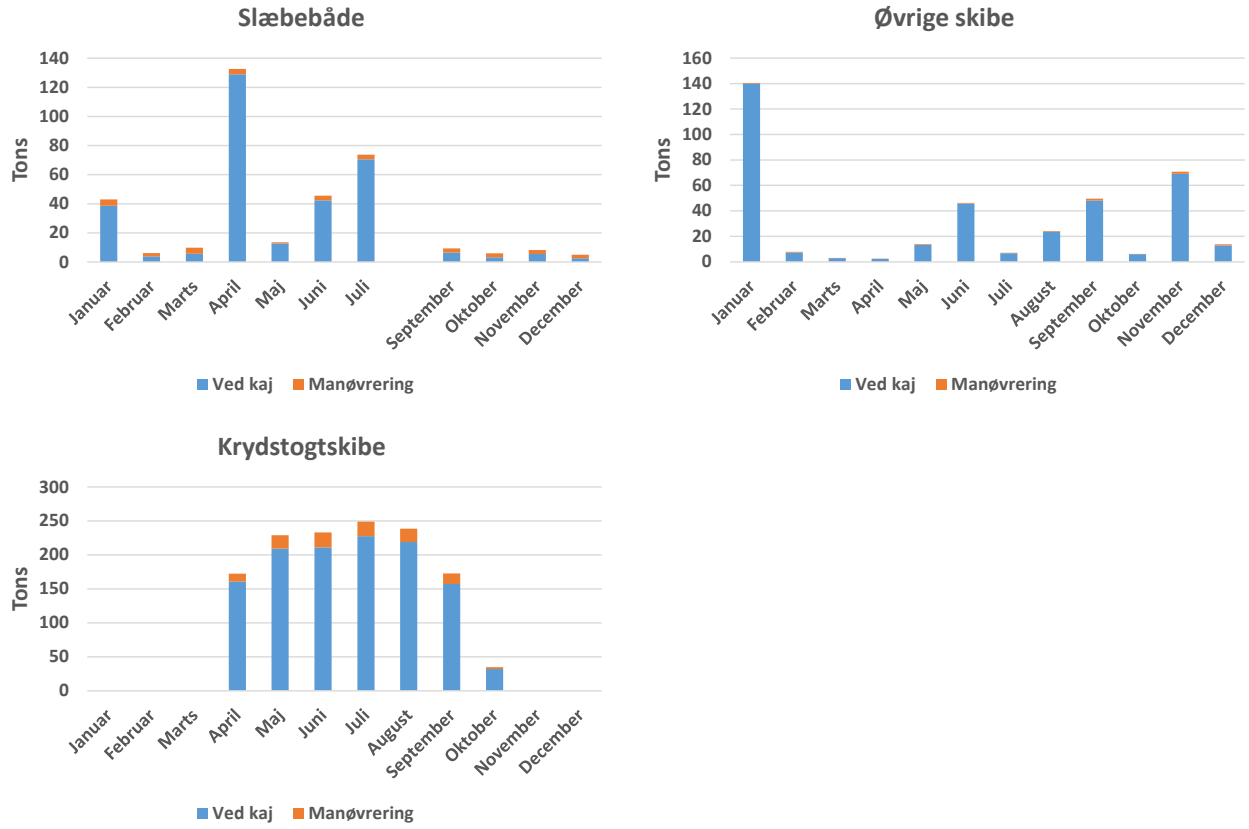

General Cargo
Tons
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering


Passagerskibe
Tons
600
500
400
300
200
100
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

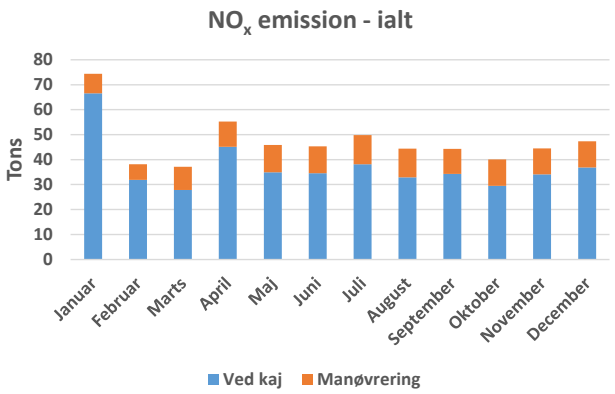

Ro-ro Cargo
Tons
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

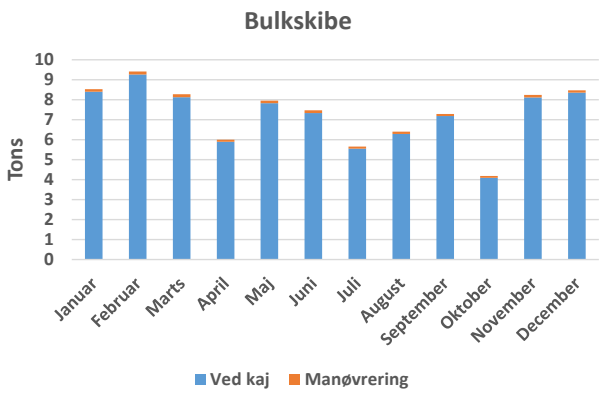

Tankskibe
Tons
300
250
200
150
100
50
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

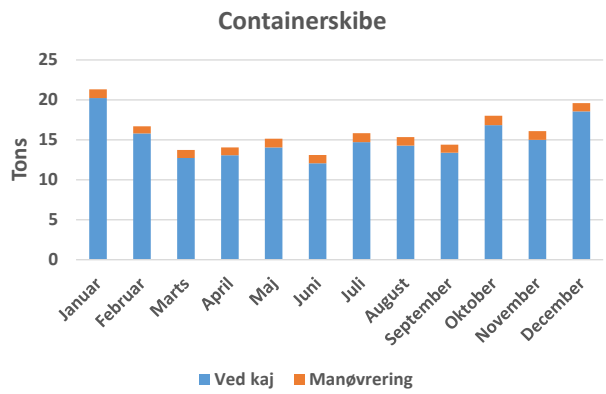

Tankskibe oliepumpning
Tons
300
250
200
150
100
50
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

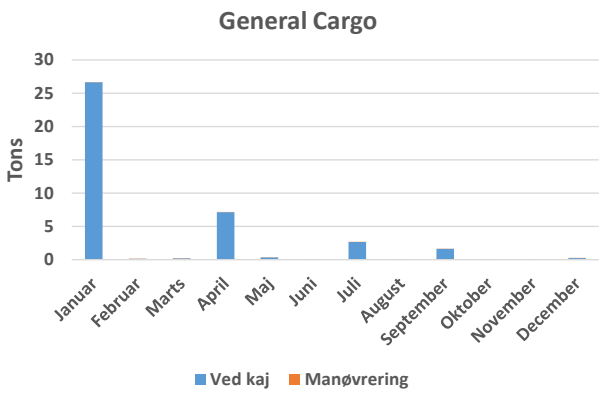


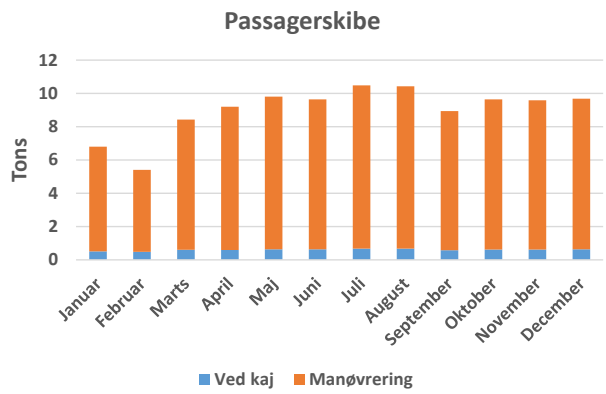
Figur B2.10. CO_{2eq}-emissioner i alt for vigtigste skibstyper i Aarhus Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).

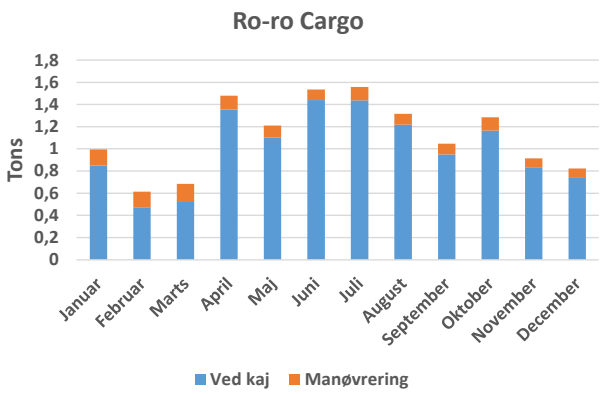

NO_x emission - ialt
Tons
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

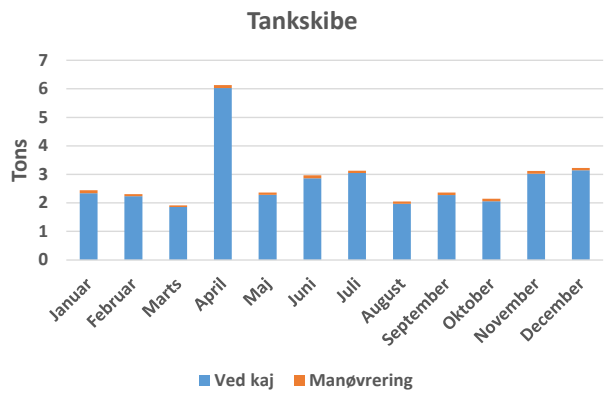

Bulkskibe
Tons
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

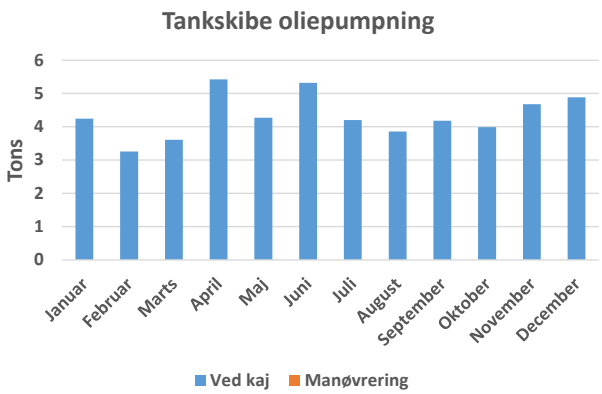

Containerskibe
Tons
25
20
15
10
5
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

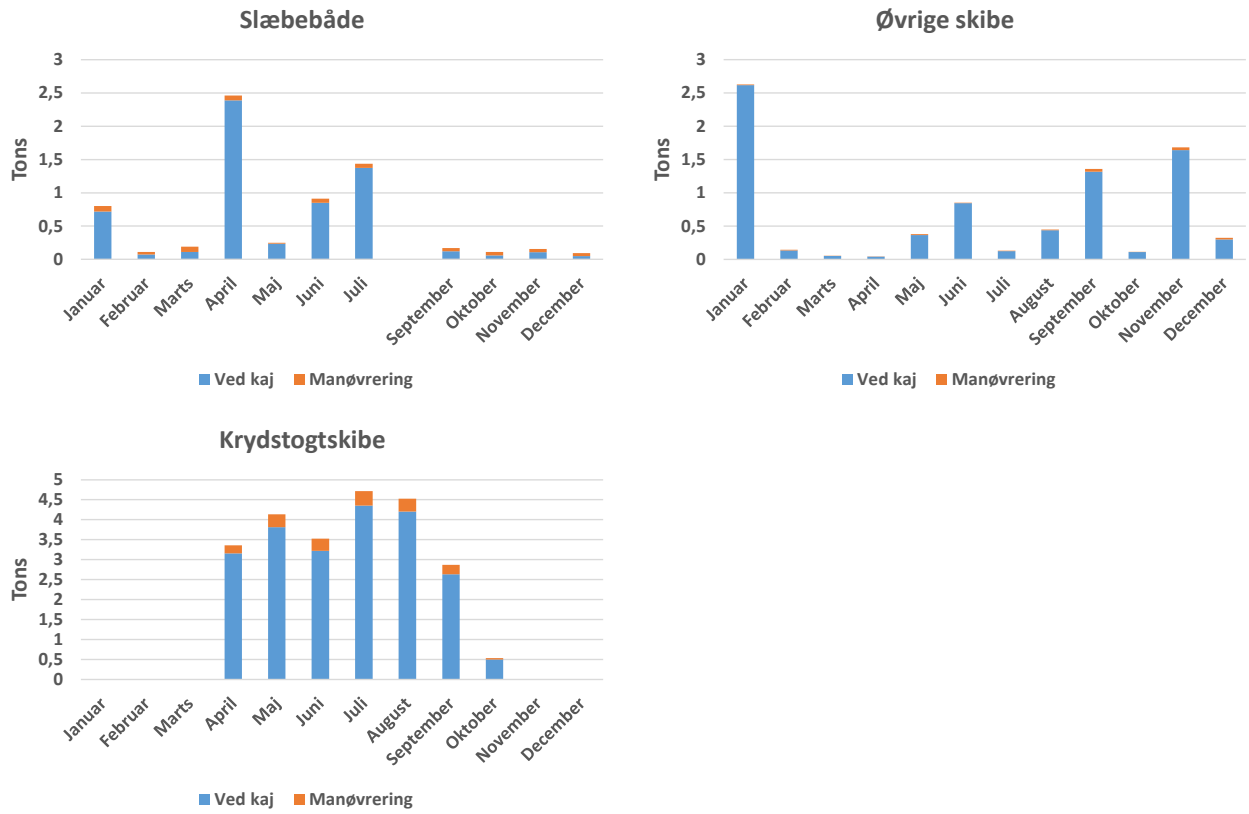

General Cargo
Tons
30
25
20
15
10
5
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering


Passagerskibe
Tons
12
10
8
6
4
2
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

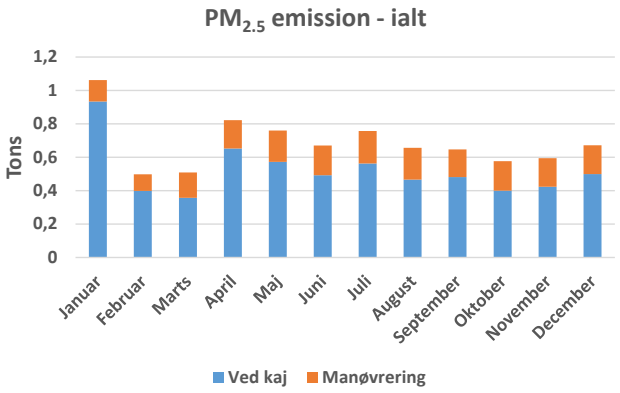

Ro-ro Cargo
Tons
1,8
1,6
1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

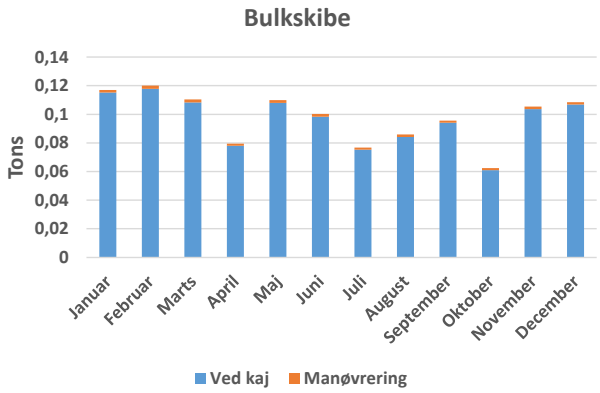

Tankskibe
Tons
7
6
5
4
3
2
1
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

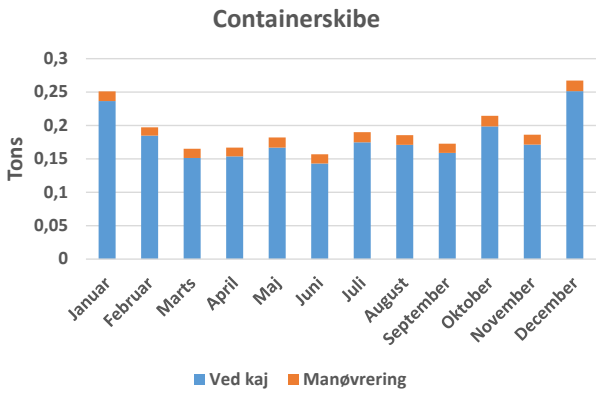

Tankskibe oliepumpning
Tons
6
5
4
3
2
1
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

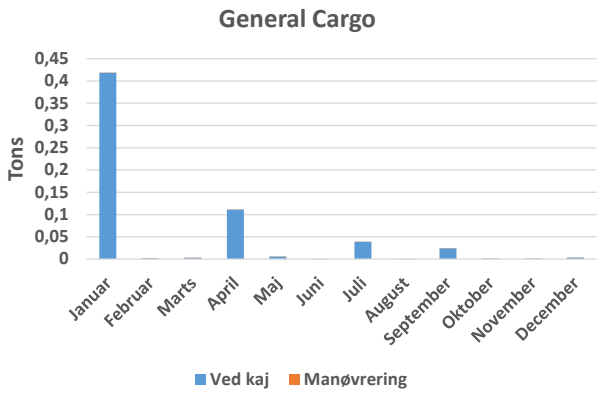


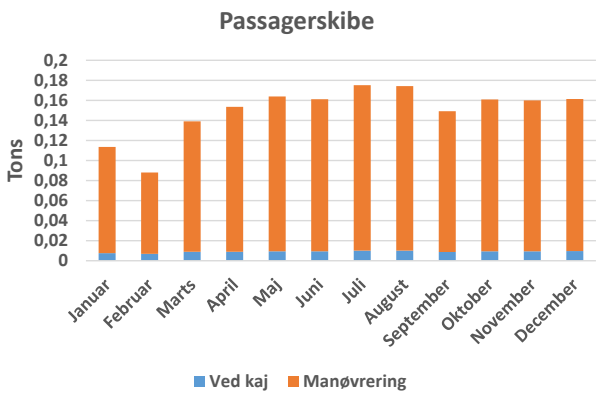
Figur B2.11. NO_x-emissioner i alt for vigtigste skibstyper i Aarhus Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).

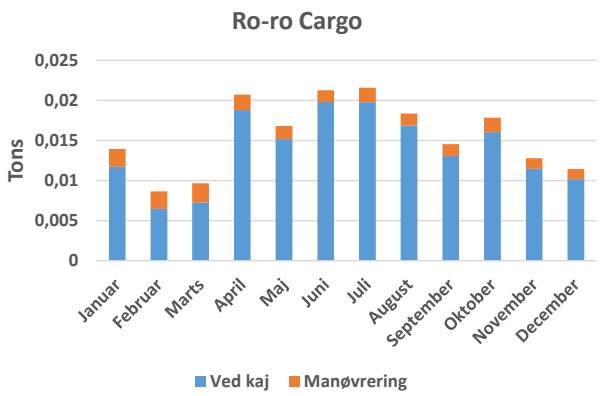

PM2.5 emission - ialt
Tons
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

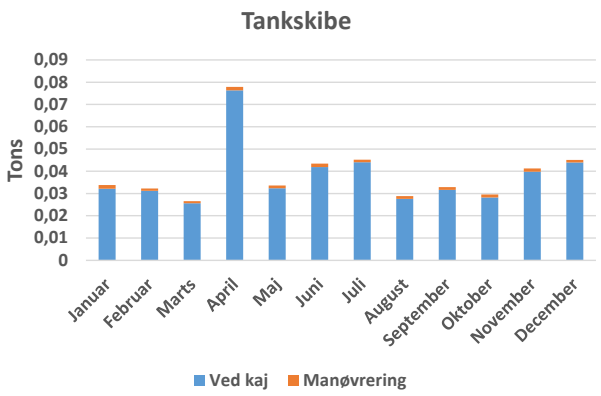

Bulkskibe
Tons
0,14
0,12
0,1
0,08
0,06
0,04
0,02
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

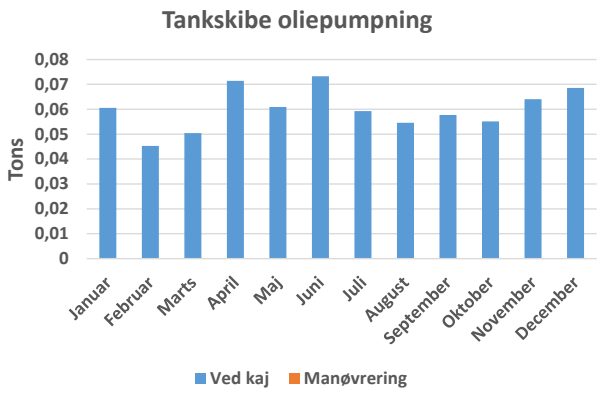

Containerskibe
Tons
0,3
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

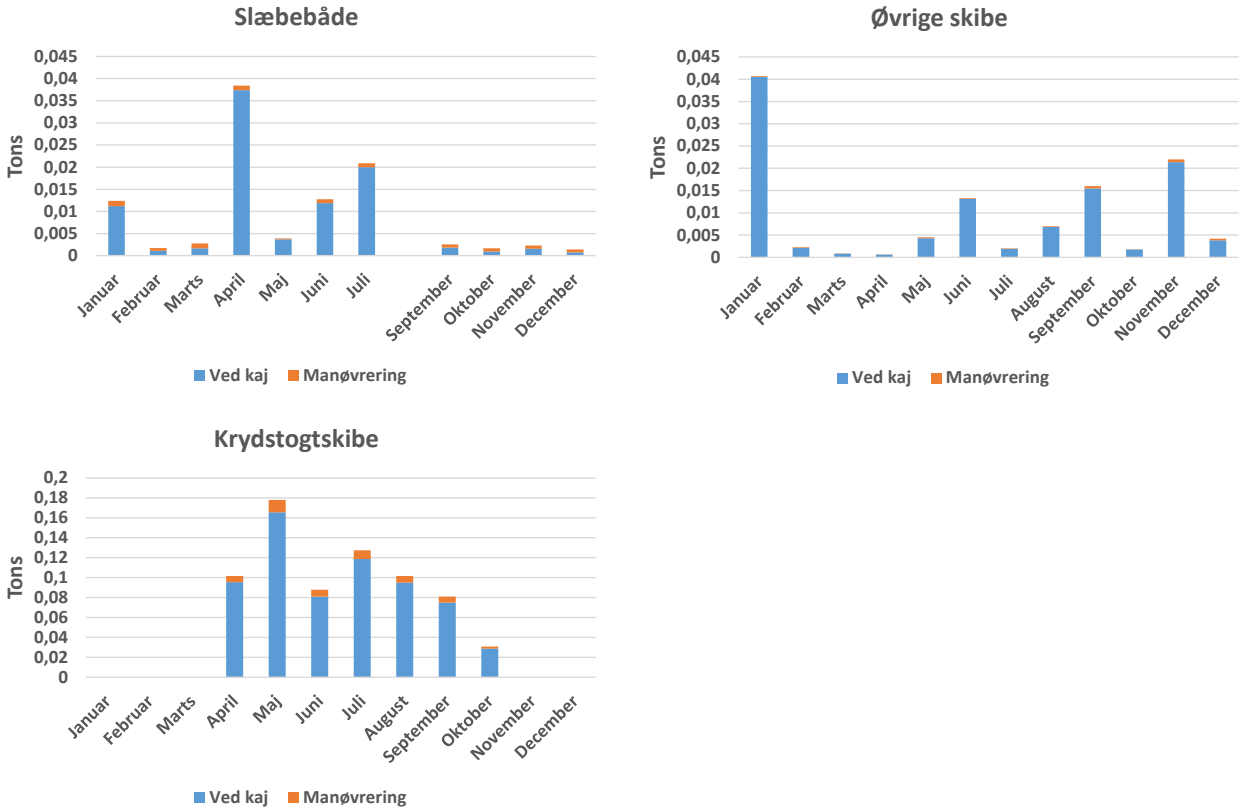

General Cargo
Tons
0,45
0,4
0,35
0,3
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering


Passagerskibe
Tons
0,2
0,18
0,16
0,14
0,12
0,1
0,08
0,06
0,04
0,02
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering


Ro-ro Cargo
Tons
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering


Tankskibe
Tons
0,09
0,08
0,07
0,06
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

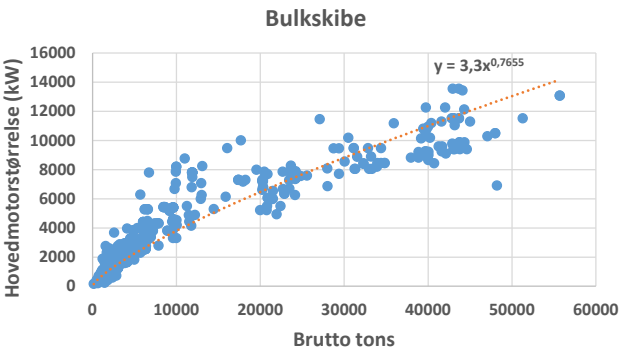

Tankskibe oliepumpning
Tons
0,08
0,07
0,06
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
0
Januar
Februar
Marts
April
Maj
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
December
Ved kaj
Manøvrering

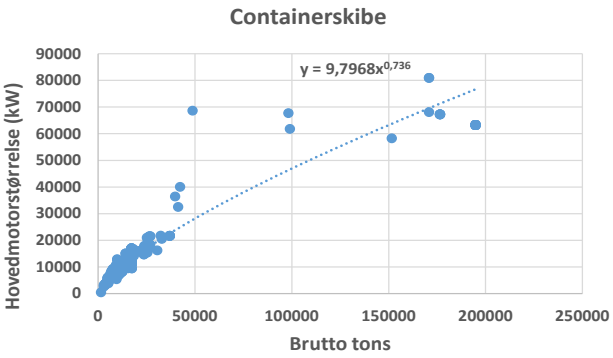


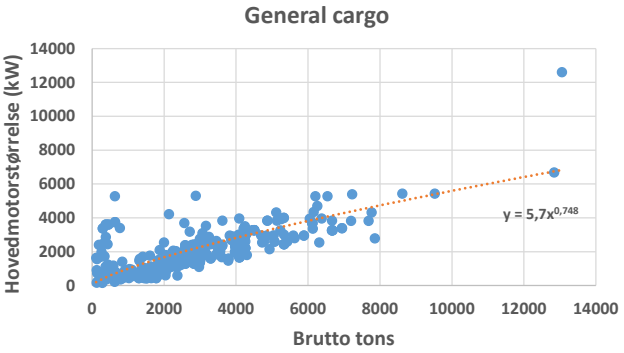
Figur B2.12. $PM_{2.5}$-emissioner i alt for vigtigste skibstyper i Aarhus Havn i 2019 fordelt pr. måned og aktivitet (manøvrering/ved kaj).

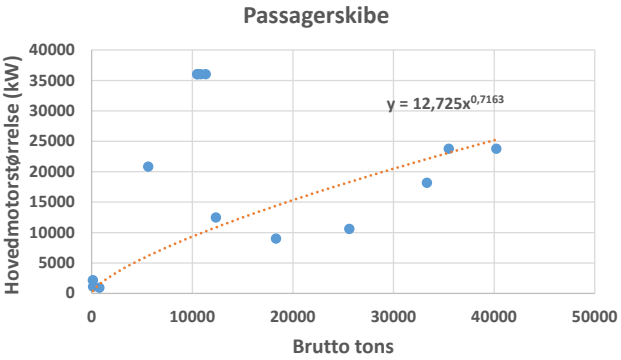
Bilag 3 Hovedmotor- og hjælpemotoreffekter som funktion af Bruttoton

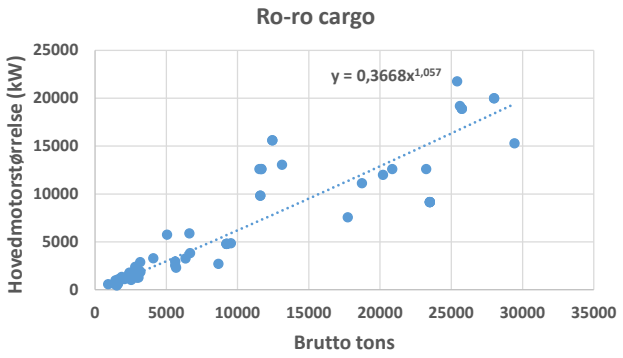
Nedenfor er vist oplysninger om hovedmotorstørrelse som funktion af bruttotons for de forskellige skibstyper i undersøgelsen (Figur B3.1) samt installeret hjælpemotoreffekt som funktion af bruttotons for de forskellige skibstyper (Figur B3.2).

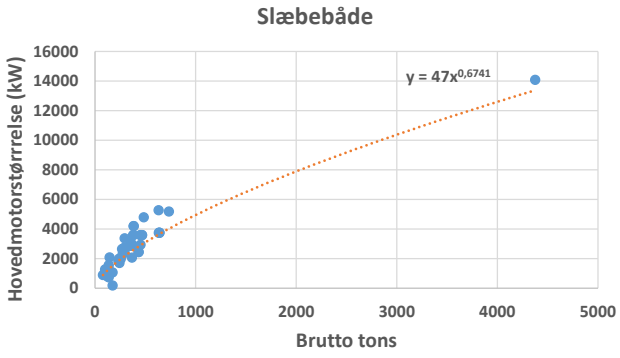

Bulkskibe
y = 3,3x^0,7655
Hovedmotorstørrelse (kW)
Brutto tons

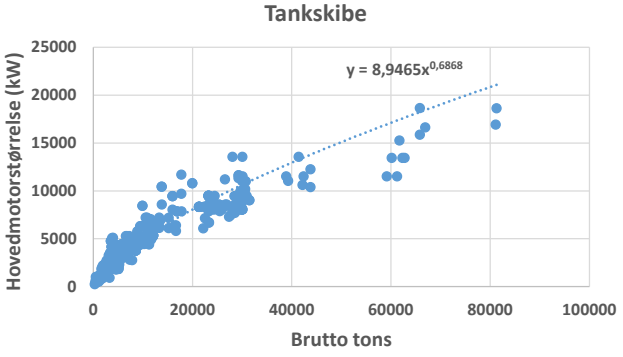

Containerskibe
y = 9,7968x^0,736
Hovedmotorstørrelse (kW)
Brutto tons

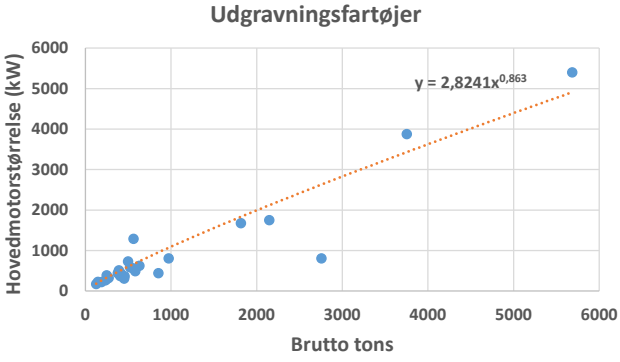

General cargo
y = 5,7x^0,748
Hovedmotorstørrelse (kW)
Brutto tons

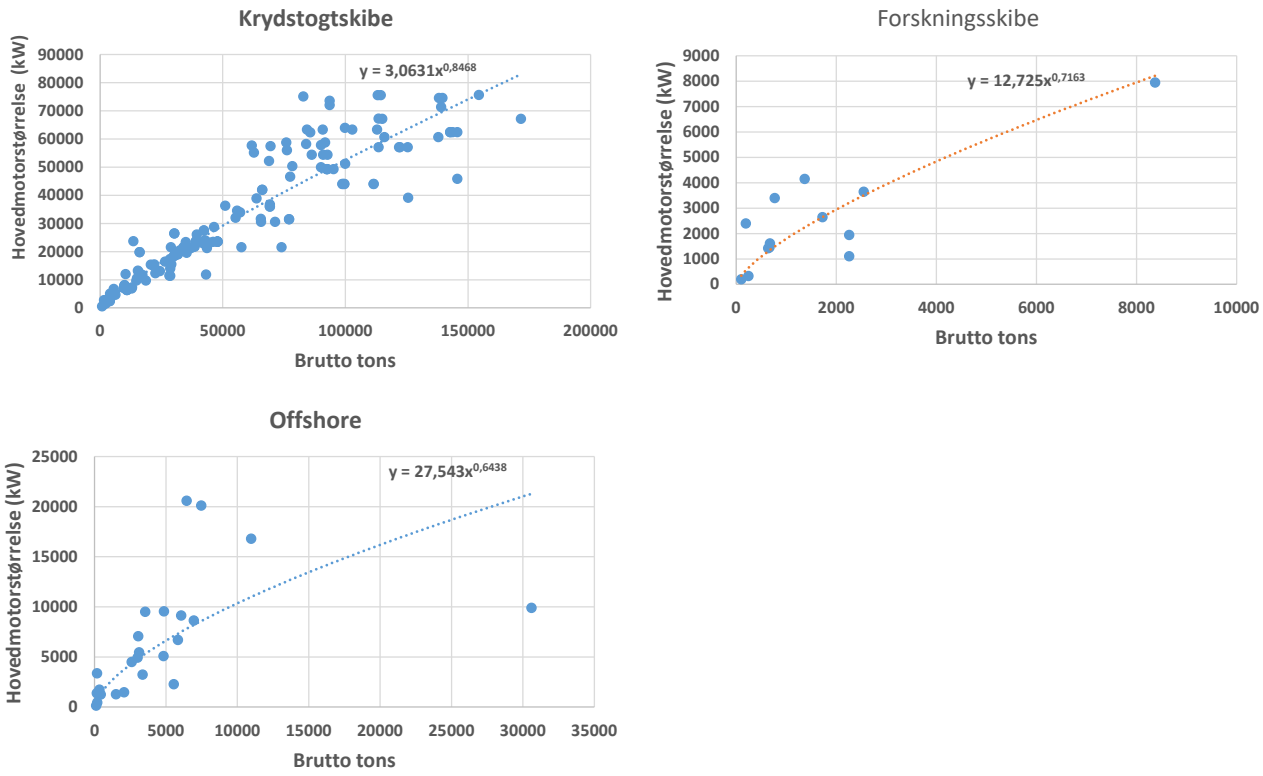

Passagerskibe
y = 12,725x^0,7163
Hovedmotorstørrelse (kW)
Brutto tons


Ro-ro cargo
y = 0,3668x^1,057
Hovedmotorstørrelse (kW)
Brutto tons

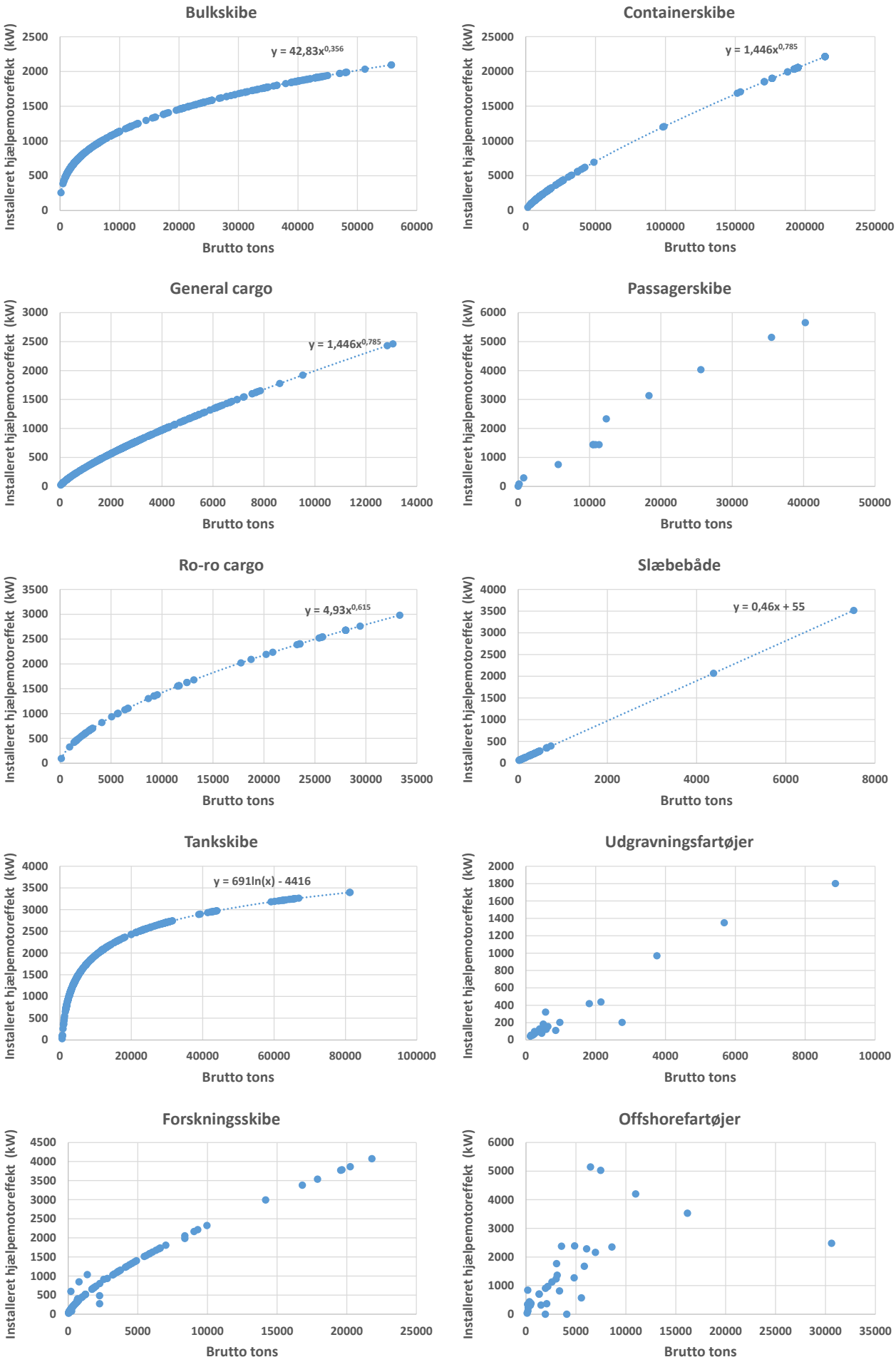

Slæbebåde
y = 47x^0,6741
Hovedmotorstørrelse (kW)
Brutto tons


Tankskibe
y = 8,9465x^0,6868
Hovedmotorstørrelse (kW)
Brutto tons


Udgravningsfartøjer
y = 2,8241x^0,863
Hovedmotorstørrelse (kW)
Brutto tons



Figur B3.1. Hovedmotorstørrelse som funktion af bruttotons for de forskellige skibstyper i undersøgelsen.



Figur B3.2. Installeret hjælpemotoreffekt som funktion af bruttotons for de forskellige skibstyper i undersøgelsen.

Bilag 4 Anløb, energiforbrug og emissioner i København Havn for 2015 til 2018

Data er indeholdt i filen http://dce2.au.dk/pub/SR413_Bilag4.xlsx (Resultater pr. havn pr. år.)

Filen er underopdelt på hver af de fem havne, og indeholder oplysninger for hvert år fra 2015 til 2019.

Der er oplysninger om: Antal anløb og timer i havn og det beregnede strømforbrug (MWh), energiforbrug (tons og GJ), og emissioner af CO_2, NO_x og $PM_{2,5}$, fordelt på skibstyper og aktivitet (manøvrering/ved kaj).

Bilag 5 Emissionsrater og fysiske parametre for alle anløb

Data er indeholdt i filen http://dce2.au.dk/pub/SR413_Bilag5.xlsx (Emissionsrater mm.)

Filen indeholder nødvendige data for at kunne gennemføre luftkvalitetsberegninger, dvs. emissionsrater og fysiske parametre for de enkelte skibe. Der er data for alle fem havne for 2015 til 2019. Data er underopdelt i hhv. krydstogtskibe og andre skibe.

Der er data om følgende parametre:

Havn
År
Skibstype
Skibsnavn
IMO kode
BT
Byggeår
Brændstoftype
Total installeret hovedmotoreffekt
Hjælpemotor-effektforbrug ved kaj
Hjælpemotor-effektforbrug under manøvrering
Skorstenshøjde over vandlinje
Bygningshøjde over vandlinje
Røggastemperatur
Røggashastighed
Røggasvolumenstrøm
Brændstofforbrug
Brændstofforbrug
NO_x-emission
PM-emission
$PM_{2.5}$-emission
CO_2-emission
CH_4-emission
N_2O-emission
CO_{2eq}-emission
Røggasvolumenstrøm
Brændstofforbrug
Brændstofforbrug
NO_x-emission
PM-emission
$PM_{2.5}$-emission
CO_2-emission
CH_4-emission
N_2O-emission

Bilag 6 Beregningsmetode for energiforbrug og emissioner

Energiforbrug og emissioner beregnes på forskellig måde for krydstogtskibe og andre skibe end krydstogtskibe for ophold ved kaj eller under manøvrering samt specifikt for tankskibes oliepumpning.

Krydstogtskibe ved kaj

Energiforbruget samt NO_x-, $PM_{2.5}$- og CH_4-emissionerne for krydstogtskibene ved kaj beregnes på følgende måde:

$$E_{kaj} = \sum_i T_i \cdot P_{leveret,j} \cdot SF \cdot EF_{k,l,y} \quad (4)$$

Hvor E = energiforbrug/emission (g), 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-, $PM_{2.5}$- og CH_4-emissionerne for krydstogtskibene under manøvrering beregnes på følgende måde:

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

Hvor E = energiforbrug/emission (g), i = anløbsnummer, T = manøvreringstid (timer, Tabel 4.1), 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-, $PM_{2.5}$- og CH_4-emissionerne for alle andre skibstyper ved kaj findes som:

$$E_{kaj} = \sum_i T_i \cdot P_{installeret,j} \cdot LF \cdot SF \cdot EF_{k,l,y} \quad (6)$$

Hvor E = energiforbrug/emission (g), i = anløbs nummer, T = opholdstid ved kaj (timer, se Tabel 4.1), 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-, $PM_{2.5}$- og CH_4-emissionerne for hovedmotorer under manøvrering beregnes med (4), hvor $P_{installeret}$ = total installeret hoved-

motoreffekt, LF = motorbelastningsfaktor findes i tabel 4.1 (40 % for slæbebåde, 10 % for alle andre skibe) og LAF = transient justeringsfaktor for energiforbrug og emissioner ved 10 % og 40 % motorbelastning er hhv. 1,21[1,07] for SFC, 1,22[1,0] for NO_x, 1,38[1,0] for $PM_{2.5}$ og 2,2[1,0] for CH_4 (se også afsnit 2.2, fodnote 2).

Energiforbruget samt NO_x-, $PM_{2.5}$- og CH_4-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). Hjælpemotorernes effektbehov sættes til 3,5 kWh/tons olie (Oxbøl og Wismann, 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-, $PM_{2.5}$- og CH_4-emissionerne for tankskibenes oliepumpning beregnes på følgende måde:

$$E_{oliepumpning} = \sum_i M_{olie,j} \cdot Q \cdot EF_{k,l,y} \quad (7)$$

Hvor E = energiforbrug/emission (kg), i = anløbsnummer, 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.

Energiforbrug (MJ)

Energiforbruget omregnes fra g til MJ på følgende måde:

$$E(MJ) = \sum_i E_j(g) \cdot LHV_k / 1000 \quad (8)$$

Hvor E (MJ) = energiforbrug i MJ, E (g) = energiforbrug i g (beregnet med formlerne 3-6), LHV = nedre brændværdi (MJ/kg, Tabel 4.2), i = anløbsnummer, j = skibsID, k = brændstoftype.

CO_2-emissioner

CO_2-emissionen beregnes som produktet af energiforbruget og den energirelaterede CO_2-emissionsfaktor:

$$E_{CO2} = \sum_i E_j(MJ) \cdot EF_{CO2,k} \quad (9)$$

Hvor E_{CO2} = CO_2-emission (kg), E (MJ) = energiforbrug (MJ), beregnet med formel 8), EF_{CO2} = CO_2-emissionsfaktor (g/MJ, Tabel 4.2), i = anløbsnummer, j = skibsID, k = brændstoftype.

N_2O-emissioner

N_2O-emissionen beregnes som produktet af energiforbruget og den brændstofvægt-relaterede N_2O-emissionsfaktor:

$$E_{N2O} = \sum_i E_j(g) \cdot EF_{N2O,k} / 1000 \quad (10)$$

Hvor E_{N2O} = N_2O-emission (g), E (g) = energiforbrug (g), beregnet med formlerne 3-6), EF_{CO2} = N_2O-emissionsfaktor (g/kg, Tabel 4.2), i = anløbsnummer, j = skibsID, k = brændstoftype.

CO_2-ækvivalent (CO_2eq) emissioner

Den samlede drivhusgasemission beregnes i CO_2-ækvivalenter som summen af CO_2-emissionen samt CH_4- og N_2O-emissionerne omregnet til CO_2-ækvivalenter ud fra IPCC's angivne drivhusgaspotentialer for CH_4 og N_2O på hhv. 25 og 298 (IPCC, 2006):

$$E_{CO2eq} = E_{CO2} + 25 \cdot E_{CH4} + 298 \cdot E_{N2O} \quad (11)$$

Hvor $E_{CO2\text{-}eq}$ = CO_{2eq}-emission (g), E_{CH4} = CH_4-emission (g), E_{N2O} = N_2O-emission (g).

KORTTLÆGNING AF UDVIKLINGEN I LUFTFORURENING FRA KRYDSTOGTSKIBE OG ANDRE SKIBE I FEM DANSKE HAVNE

Rapporten beskriver anløb af krydstogtskibe og andre skibe i fem danske havne i perioden 2015-2019 og de tilhørende emissioner. Med OML-modellen er det beregnet, hvor meget krydstogtskibene og andre skibe bidrager til luftkvaliteten i nærområderne af skibene. De fem havne er Københavns Havn, Aarhus Havn, Aalborg Havn, Skagen Havn og Rønne Havn.

ISBN: 978-87-7156-546-1
ISSN: 2244-9981