

Sparede emissioner ved landstrøm for færger og krydstogtskibe i Københavns Havn og Aarhus Havn

Morten Winther¹, Anne Sofie Lansø*

¹Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet, Roskilde

[*mwi@envs.au.dk](mailto:mwi@envs.au.dk)

Abstrakt

Når skibe bruger landstrøm i havn, reduceres deres emissioner meget effektivt, og samtidig forbedres luftkvaliteten i havnene og de nærliggende byområder. Landstrømsanlæg (OPS: Onshore Power Supply) til færger blev etableret i 2020 på Molslinjens hurtigfærgeterminal i Aarhus Havn og i 2021 på DFDS' passagerfærgeterminal i Københavns Havn. OPS er også etableret for krydstogtskibe ved en krydstogtkajplads i Aarhus Havn i 2023, og mellem 2025 og 2028 er det planlagt at installere OPS på fem krydstogtkajpladser i Københavns Havn.

Denne artikel præsenterer det maksimale potentiale for emissionsbesparelser i Københavns Havn og Aarhus Havn for en situation, hvor alle færger og krydstogtskibe er fuldt tilsluttet OPS, hvilket betyder, at alle skibe modtager landstrøm i stedet for at producere elektricitet med deres dieselmotorer, mens de ligger ved kaj.

I Københavns Havn udgør de beregnede emissionsbesparelser for krydstogtskibe langt de største dele af de samlede beregnede emissionsbesparelser for krydstogtskibe og færger i havnen. For krydstogtskibene beregnes følgende procentvise besparelsesandele (angivet i parentes) for brændstofforbrug (94 %), SO₂ (92 %), NO_x (91 %), PM_{2,5} (97 %), CO₂ (94 %), CH₄ (100 %), N₂O (92 %) og CO_{2eq} (94 %). Krydstogtskibenes meget store besparelsesandele for PM_{2,5} og CH₄ skyldes de meget store PM_{2,5}- og CH₄-emissioner, der undgås fra hhv. de HFO-drevne og (de få) LNG-drevne krydstogtskibe, når landstrøm bruges.

Også i Aarhus Havn udgør de beregnede emissionsbesparelser for krydstogtskibe langt de største dele af de samlede beregnede emissionsbesparelser for krydstogtskibe og færger i havnen. For krydstogtskibene beregnes følgende procentvise besparelsesandele (angivet i parentes) for brændstofforbrug (74 %), SO₂ (98 %), NO_x (79 %), PM_{2,5} (89 %), CO₂ (74 %), CH₄ (79 %), N₂O (74 %) og CO_{2eq} (74 %). I Aarhus Havn er andelen af sparede SO₂- og PM_{2,5}-udledninger særligt høje for krydstogtskibe set i forhold til færger, fordi det effektive svovlindhold på 0,1 % i brændstoffet krydstogtskibene sparer ved at bruge landstrøm er meget højere end svovlindholdet på 0,005 % i det MDO/MGO-brændstof færgerne sparer ved at bruge landstrøm, og fordi der undgås meget store PM_{2,5}-emissioner fra de HFO-drevne krydstogtskibe.

Faktiske elforbrugstal for tre krydstogtskibe i Aarhus Havn, oplyst ved projektperiodens afslutning, er en del lavere end elforbruget, der beregnes for skibene. Dette peger på en stor usikkerhed ved at bruge beregnede elforbrug som input til emissionsberegningerne, og at de beregnede sparede brændstofforbrug og

emissioner for krydstogtskibe sandsynligvis er for høje. De mest præcise resultater for sparede brændstofforbrug og emissioner vil kunne opnås ved at bruge faktiske elforbrugsdata i beregningerne for alle skibe, der modtager landstrøm i havn.

1. Indledning

Landstrømsanlæg i havne giver krydstogtskibe og færger mulighed for at bruge elektricitet leveret fra elnettet, mens de ligger ved kaj, og på den måde kan skibene undgå at bruge deres hjælpemotorer til at generere den nødvendige strøm. Når skibene ikke bruger hjælpemotorer, mens de ligger ved kaj, fjernes hjælpemotorernes emissioner af både drivhusgasser og luftforurenende stoffer, og støjen fra hjælpemotorerne elimineres også.

I 2020 blev Copenhagen Malmö Port (CMP), Aarhus Havn, Stockholm Havn og Helsinki Havn tildelt EU-midler til etablering af landstrøm (OPS: Onshore Power Supply) til krydstogtskibe og til etablering af OPS til passagerfærger i Københavns Havn (DFDS) og Aarhus Havn (Molslinjen).

Frem til nu er OPS etableret ved en krydstogtkajplads i Aarhus Havn i 2023 og ved to krydstogtkajpladser i Stockholm Havn i 2024. Mellem 2025 og 2028 vil OPS blive installeret på fem kajpladser for krydstogtskibe i Københavns Havn, og i Helsinki Havn er det planen for krydstogtskibe, at OPS skal etableres ved to eller tre kajpladser.

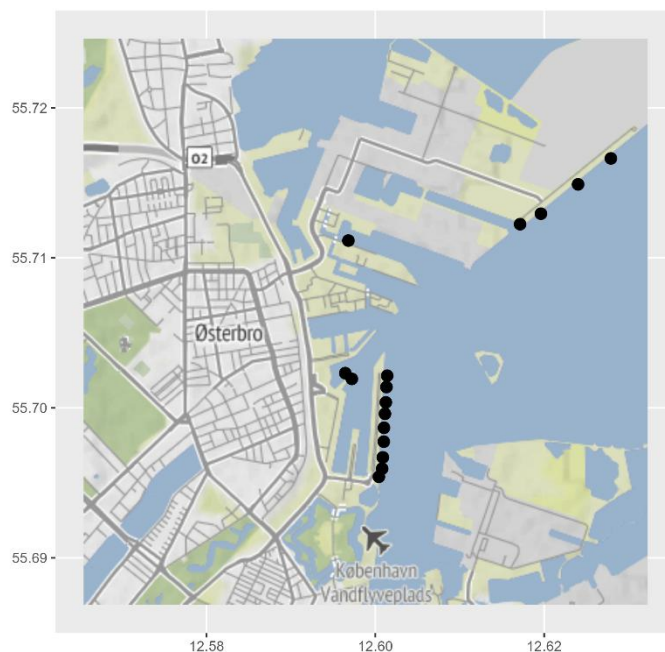
Desuden er OPS allerede etableret i 2020 på Molslinjens hurtigfærgeterminal på Aarhus Havn og i 2021 på DFDS' passagerfærgeterminal i Københavns Havn.

Et krav fra EU's side til støttemodtagerne har været en analyse af effekten på emissionerne af drivhusgasser (GHG) og forurenende stoffer (NO_x , $\text{PM}_{2.5}$ og SO_2) samt støj og luftkvalitet ved etablering af OPS i de fire respektive havne, som Nationalt Center for Miljø og Energi (DCE) har gennemført.

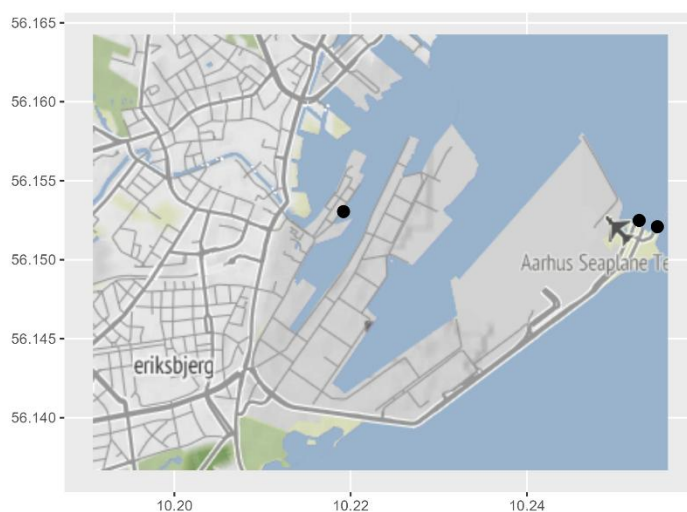
Formålet med denne artikel er at bestemme de sparede emissioner for krydstogtskibene og færgerne i de to danske havne - Københavns Havn og Aarhus Havn - for en situation, hvor alle færger og krydstogtskibe er fuldt tilsluttet OPS. Dette betyder, at alle skibe modtager landstrøm i stedet for at producere elektricitet med deres dieselmotorer, mens de ligger ved kaj. Disse emissioner, der forhindres på grund af OPS-tilslutning, betegnes som de "sparede emissioner" i det følgende.

Artiklen viser de benyttede aktivitetsdata for krydstogtskibe (antallet af anløb) og færger (antal ladesessioner og MWh), og det forklares, hvordan elbehovet beregnes for krydstogtskibe ved kaj. Dernæst beskrives de specifikke brændstofforbrug og emissionsfaktorer, der bruges i beregningerne af det sparede brændstofforbrug og emissioner, og beregningsmetoden forklares. Herefter vises resultater for de beregnede sparede emissioner for krydstogtskibe og færger.

Figur 1 og 2 viser de geografiske områder omkring Københavns Havn og Aarhus Havn samt de omkringliggende byområder.



Figur 0. Kort over København, der dækker den centrale del af byen og havneområdet. Kortet dækker et areal på 4 km gange 4 km. De sorte prikker på kortet angiver kajpladser benyttet af krydstogtskibe, der anløber København i løbet af 2023 og kajpladser til DFDS-færgerne.



Figur 2. Kort over Aarhus, der dækker den centrale del af byen og havneområdet. Kortet dækker et areal på 4 km gange 3 km. De sorte prikker på kortet angiver kajpladser benyttet af krydstogtskibe, der anløber Aarhus i løbet af 2023 og kajpladser til Molslinjen-færgerne.

2. Aktivitetsdata

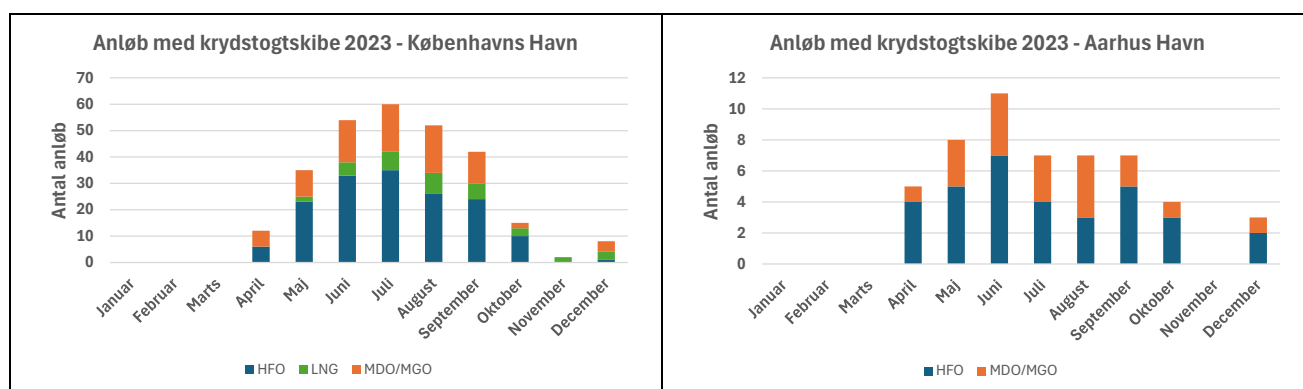
Som aktivitetsdata i projektet bruges antallet af anløb for krydstogtskibe og antallet af ladesessioner og MWh for færger i Københavns Havn og Aarhus Havn i 2023.

2.1. Antal anløb med krydstogtskibe

For krydstogtskibe har havnene oplyst anløbsdata i 2023, der indeholder oplysninger om bl.a. skibets navn, skibstype, IMO-kode, bruttoton (BT) og ankomst- og afsejlingstidspunkt, havneområde og kajnummer (Nørgaard, 2024a).

I 2023 var der i alt 280 anløb med krydstogtskibe i Københavns Havn (158 HFO, 86 MDO/MGO og 36 LNG) og 52 anløb med krydstogtskibe i Aarhus Havn (33 HFO, 19 MDO/MGO).

Den benyttede brændstoftype for det enkelte skib bestemmes ved internetopslag (marinetraffic.com, forskellige hjemmesider for rederier, værfter mv.), og på samme måde bestemmes det, om skibet har en scrubber om bord til at rense udstødningsgassen for svovl (og derfor antages at bruge HFO i havn), eller om skibet bruger LNG. Hvis dette ikke er tilfældet, antages skibet at bruge MDO/MGO i havn.

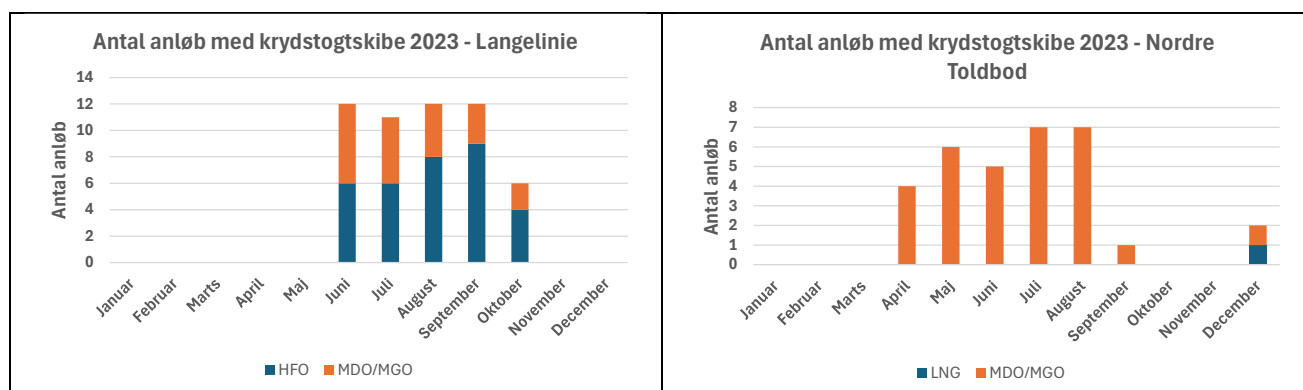


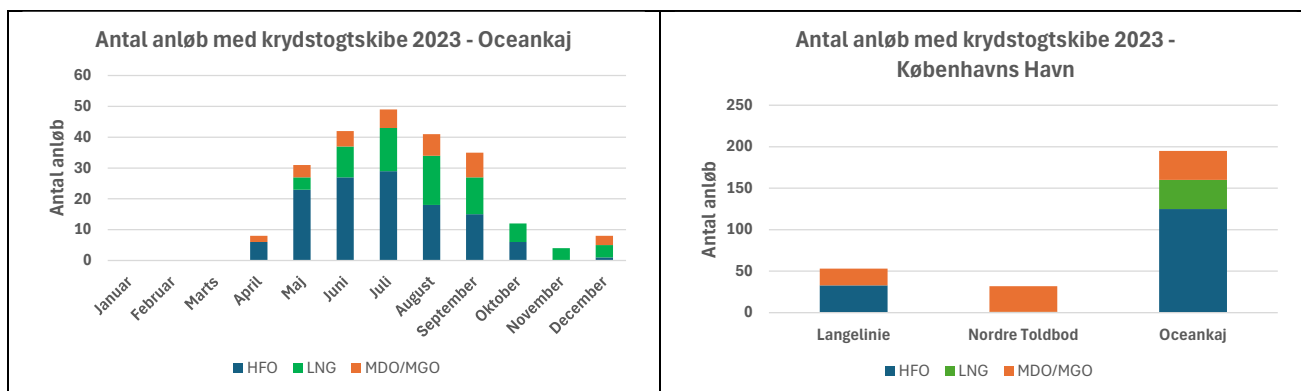
Figur 3. Antallet af anløb med krydstogtskibe i Københavns Havn og Aarhus Havn i 2023, fordelt på brændstoftype og måned.

Figur 3 viser antallet af anløb med krydstogtskibe i Københavns Havn og Aarhus Havn i 2023, fordelt på brændstoftype og måned.

De fleste krydstogtanløb sker i perioden maj til september. Der er dog også nogle få anløb i april, oktober, november og december, afhængig af den enkelte havn. Krydstogtskibene anløber primært i dagtimerne, og det gennemsnitlige ankomsttidspunkt for krydstogtskibene er mellem kl. 8 og 9 om morgenen. I Københavns Havn og Aarhus Havn er de gennemsnitlige afgangstider hhv. kl. 22 og 19. Luftforurening fra skibene i de to havne finder derfor typisk sted i de nævnte perioder.

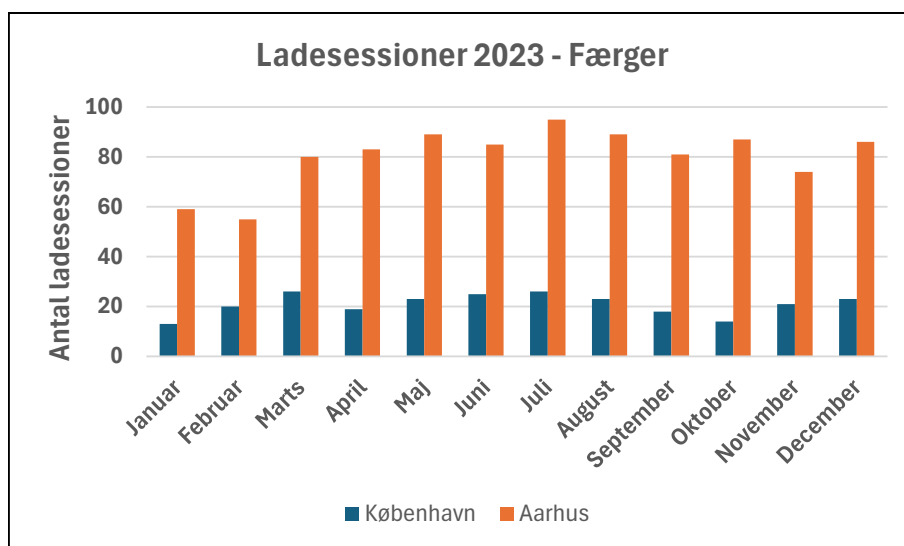
Krydstogtskibenes anløb i Københavns Havn er geografisk spredt. Figur 4 viser antallet af anløb i Københavns Havn på lokaliteterne Oceankaj, Langelinie og Nordre Toldbod, fordelt pr. måned og brændstoftype, og kun pr. brændstoftype. De fleste krydstogtanløb sker ved Oceankaj (195 anløb), efterfulgt af Langelinie og Nordre Toldbod med hhv. 53 og 32 anløb.





Figur 4. Antal anløb med krydstogtskibe i Københavns Havn på lokaliteterne Oceankaj, Langelinie og Nordre Toldbod, fordelt pr. måned og brændstoftype, og kun pr. brændstoftype.

2.1. Ladesessioner med færger



Figur 5. Antal ladesessioner for færger i Københavns Havn og Aarhus Havn pr. måned i 2023.

På Aarhus Havn tilsluttes færgerne kun OPS, når de ligger ved kaj i længere tid (overnatning), fordi der ikke er tid til at tilslutte færgen på hurtigfærgeterminalen til OPS under det korte ophold mellem ankomst og afgang. I Københavns Havn tilsluttes færgerne OPS ved hvert anløb. De eneste undtagelser for OPS-forbindelse er udfald af OPS-systemet, eller, for færgerne i Københavns Havn, dårlige vejrforhold, som giver en usikker OPS-forbindelse, eller hvis redningsbådene er i vandet under en brandøvelse, og OPS-forbindelsen derfor er fysisk blokeret.

3. Beregningsmetode for sparet brændstofforbrug og emissioner

3.1 Elforbruget for krydstogtskibe ved kaj

Det har ikke været muligt at fremskaffe data for elforbruget for de enkelte krydstogtskibe ved kaj i dette projekt. Elforbruget estimeres i stedet ved at bruge en relation mellem BT (skibets bruttotons) og krydstogtskibenes konstante mekaniske motoreffekt brugt til at generere elektricitet om bord ved kaj, og

efterfølgende estimere eleffekten ved at tage højde for en mekanisk nyttevirkningsgrad for dieselgeneratoren på 95 % som oplyst af Christensen (2024).

Sammenhængen mellem BT og den mekaniske motoreffekt ved kaj er taget fra en tidligere emissionsundersøgelse for krydstogtskibe i danske havne (Jensen et al., 2021):

$$P_{mek} = 0,084 \cdot BT + 242,58 \quad (1)$$

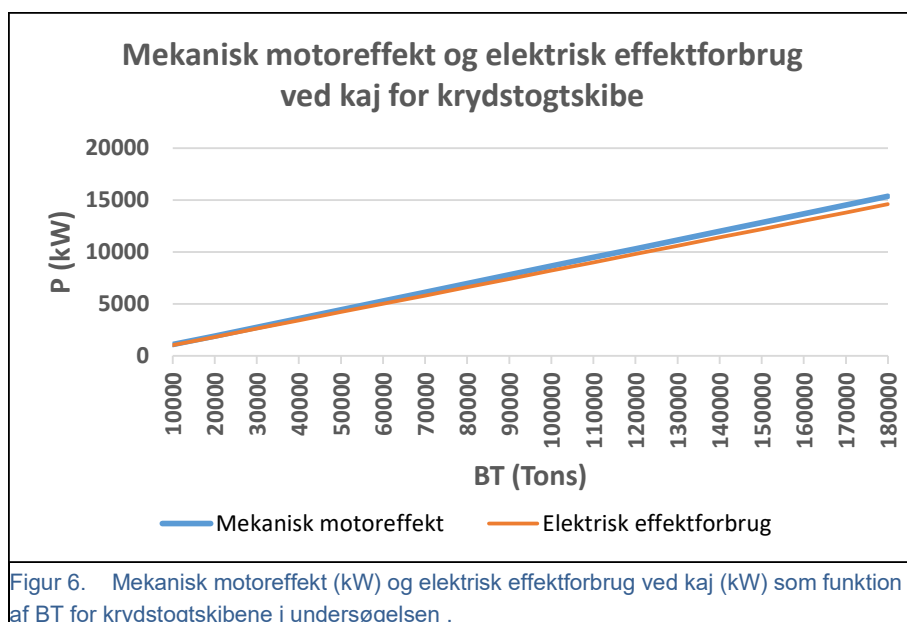
Hvor P_{mek} = mekanisk motoreffekt leveret ved kaj (kW) og BT = skibets bruttotons.

Herefter beregnes det elektriske effektforbrug, P_{el} , som:

$$P_{el} = P_{mek} \cdot \eta_{gen} \quad (2)$$

Hvor P_{el} = det elektriske effektforbrug ved kaj (kW) og η_{gen} = mekanisk nyttevirkningsgrad for dieselgeneratoren = 0,95.

Figur 6 viser motorens mekaniske effekt (kW) og det elektriske effektforbrug ved kaj (kW) som funktion af BT for krydstogtskibene i undersøgelsen.



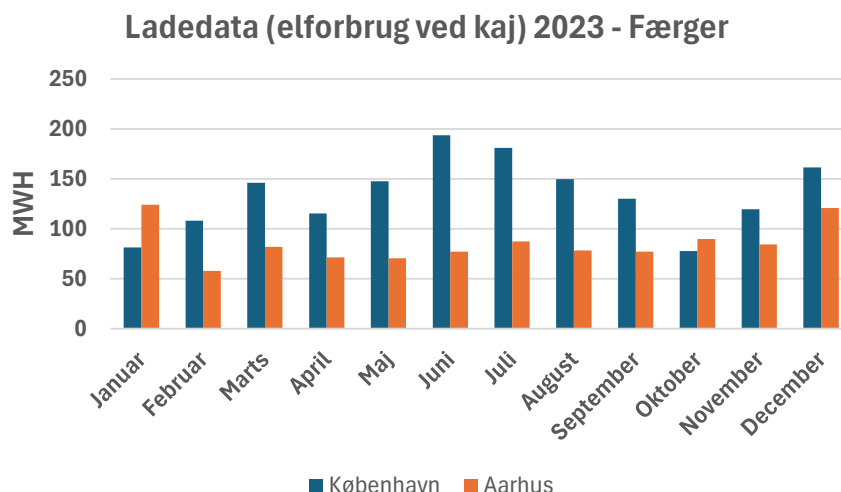
Figur 6. Mekanisk motoreffekt (kW) og elektrisk effektforbrug ved kaj (kW) som funktion af BT for krydstogtskibene i undersøgelsen .

Den leverede mekaniske motoreffekt (kW) for krydstogtskibene ved kaj, P_{mek} , bruges som input til beregning af det sparede brændstofforbrug og de sparede emissioner i ligning (4).

3.2 Ladedata for færger ved kaj

Ladedata for strøm til færgerne i Københavns Havn og Aarhus Havn pr. ladesession og tidspunkt for til- og frakobling er leveret af Fogh (2024) og Nørgaard (2024b), og er vist optalt pr. måned for 2023 i Figur 7.

Færgernes elektriske effektforbrug ved kaj (kW), P_{el} , bruges som input til beregning af det sparede brændstofforbrug og de sparede emissioner i ligning (5).

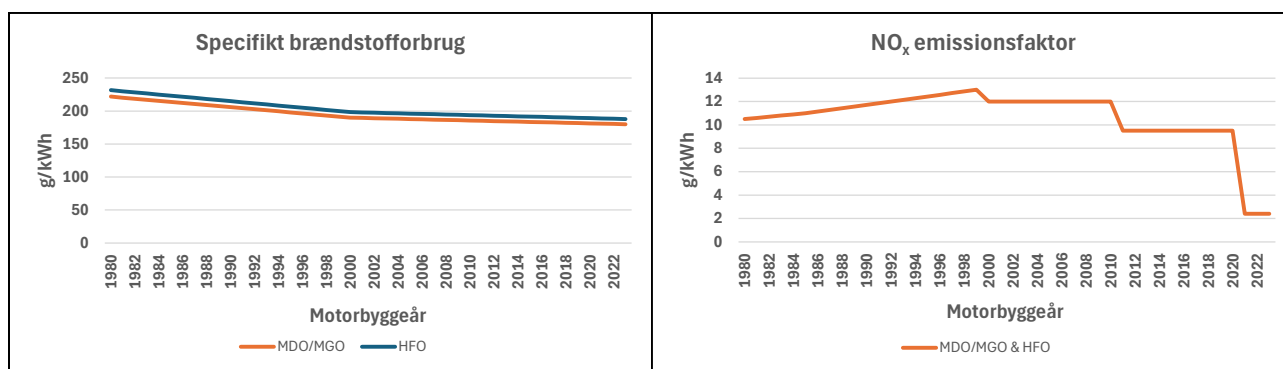


Figur 7. Ladedata for strøm til færgerne i Københavns Havn og Aarhus Havn pr. måned i 2023.

3.3 Specifikt brændstofforbrug og emissionsfaktorer

Krydstogtskibe bruger i de fleste tilfælde et dieselelektrisk system, hvor 4-takts medium speed dieselmotorer genererer strøm til elektriske motorer, der både bruges til skibets fremdrift og til at dække skibets elbehov, når det ligger i havn.

Figur 8 viser det specifikke brændstofforbrug og NO_x-emissionsfaktoren (g/kWh) som funktion af motorbyggeår for medium speed (4-takt) dieselmotorer (MAN Energy Solutions, (2024)). For Molslinjens færger i Aarhus benyttes NO_x-emissionsfaktorer oplyst af Kristensen (2013). 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).



Figur 8 Specifikke brændstofforbrug og NO_x emissionsfaktorer som funktion af motorbyggeår for medium speed skibsmotorer anvendt i undersøgelsen.

PM-emissionsfaktorerne (g/kWh) for HFO og MDO/MGO kommer fra IMO (2015) og afhænger generelt af svovlindholdet (S %) i brændstoffet og motorens specifikke brændstofforbrug (sfc). Svovlindholdet (Fs) kendes ikke specifikt for det brændstof skibene bruger i undersøgelsen. Hvis skibet har en scrubber ombord antages som før nævnt at skibet bruger HFO, og et globalt gennemsnit for svovlindholdet i HFO (2,6 % S) bruges som rapporteret i IMO's årlige måleprogram (se f.eks. IMO, 2018). Scrubberen forventes at rense skibets SO₂ emission ned til et niveau der svarer til en effektiv svovlprocent på 0,1 % der opfylder svovlkravet i et SECA-område. For MDO/MGO bruges svovlkravet i et SECA-område (Fs = 0,1% S). Den sidstnævnte

svovlprocent bruges også for færgerne i Københavns Havn, mens der anvendes en svovlprocent på 0,005 % for færgerne i Aarhus Havn, som oplyst af Nielsen (2022).

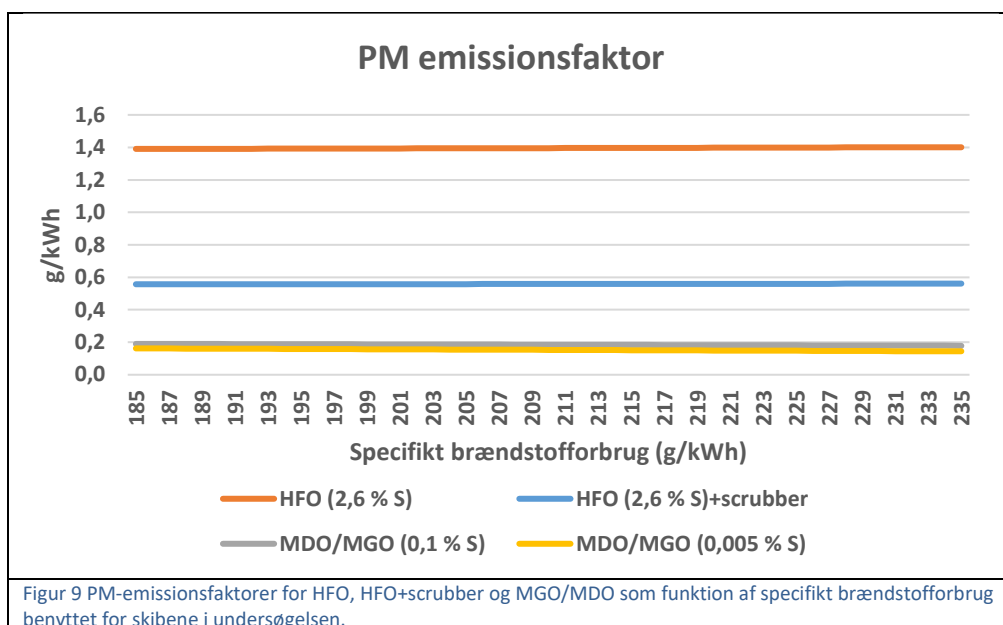
PM-emissionsfaktorerne beregnes på følgende måde for HFO og MDO/MGO:

$$EF_{PM,HFO}(g/kWh) = 1.35 + (sfc \cdot 7 \cdot 0.02247 \cdot (S\%/100 - 0.0246)) \quad (3)$$

$$EF_{PM,MDO}(g/kWh) = 0.23 + (sfc \cdot 7 \cdot 0.02247 \cdot (S\%/100 - 0.0024)) \quad (4)$$

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

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



Figur 9 viser PM-emissionsfaktorerne beregnet for HFO, HFO+scrubber og MGO/MDO med de anvendte svovlprocenter vist i parentes. Da alle skibe med en scrubber ombord som før nævnt antages at bruge HFO som brændstof, er det kun emissionsfaktoren for HFO+scrubber, der bruges for brændstoffypen HFO i dette projekt. For skibe der bruger scrubber antages en partikelreduktionsfaktor på 60 % bestemt ud fra et litteraturstudie rapporteret i Jensen et al. (2019). Omvendt justeres skibenes effektbehov med et tillæg på 2 % til brug for scrubberens drift (Hansen, 2020).

Som CO_2 -emissionsfaktorer for HFO, MDO/MGO og LNG bruges hhv. 78, 74,1 og 56,8 kg/GJ hentet fra Danmarks nationale emissionsopgørelse (se f.eks. Winther, 2024). N_2O -emissionsfaktorerne for HFO og MDO/MGO er 0.08 g/kg, hentet fra Myhre et al. (2013).

CH_4 -emissionsfaktoren for HFO og MDO/MGO er 0.015 g/kWh, afledt af en CH_4 -andel af samlet VOC på 0,03 (EMEP/EEA, 2023). VOC-emissionsfaktoren for HFO og MDO/MGO er 0.5 g/kWh (Transportministeriet, 2015). For LNG (Liquified Natural Gas), bruges en CH_4 -emissionsfaktor på 2,442 g/kWh fra Bengtsson et al. (2011).

Tabel 1 viser emissionsfaktorerne for CO_2 , CH_4 , N_2O og nedre brændværdier (LHV) pr. brændstoffype i projektet.

Tabel 1. Emissionsfaktorerne for CO₂, CH₄ og N₂O, svovlprocenter og nedre brændværdier (LHV) pr. brændstoftype der bruges i dette studie.

Brændstoftype	CO ₂ Kg/GJ	CH ₄ g/kWh	N ₂ O g/kg	Svovlprocent (Fs) %	LHV MJ/kg
HFO	78	0,015	0,08	2,6% (0,1% efter scrubber)	40,9
MDO/MGO	74,1	0,015	0,08	0,1%, 0,005% (Aarhus)	42,7
LNG	56,8	2,442	-		47,9

3.4 Beregningsmetode

Brændstofforbrug, NO_x, PM_{2.5} og CH₄

Det sparede brændstofforbrug og de sparede NO_x-, PM_{2.5}- og CH₄-emissioner for krydstogtskibene, der bruger OPS i stedet for selv at producere strømmen med en dieselgenerator, beregnes på følgende måde:

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

Hvor E = Energiforbrug eller emissioner (g), i = anløbsnr., T = opholdstid ved kaj (timer), P_{mek} = mekanisk motoreffekt ved kaj for det enkelte skib (kW, beregnet med (1)), EF = faktor for brændstofforbrug/emissioner (g/kWh), j = skibs-ID, k = brændstoftype, y = motorbyggeår.

Det sparede brændstofforbrug og de sparede NO_x-, PM_{2.5}- og CH₄-emissioner for færgerne der bruger OPS, beregnes på følgende måde:

$$E_{kaj} = \sum_i T_i \cdot P_{el,j} / \eta_{gen} \cdot EF_{k,y} \quad (6)$$

Hvor E = Energiforbrug eller emissioner (g), i = anløbsnr., T = opholdstid ved kaj (timer), P_{el} = elektrisk effektforbrug ved kaj for færgen (kW), η_{gen} = mekanisk nyttevirkningsgrad for dieselgeneratoren = 0,95, EF = faktor for brændstofforbrug/emissioner (g/kWh), j = skibs-ID, k = brændstoftype, y = motorbyggeår.

Energiforbrug (MJ)

Det sparede brændstofforbrug omregnes fra g til MJ på følgende måde:

$$E(MJ) = \sum_i E_j(g) \cdot LHV_k / 1000 \quad (7)$$

Hvor E (MJ) = energiforbrug i MJ, E (g) = brændstofforbrug i g (beregnet med formlerne 5-6), LHV = nedre brændværdi (MJ/kg, Tabel 1), i = anløbsnr., j = skibs ID, k = brændstoftype.

CO₂-emissioner

De sparede CO₂-emissioner beregnes som produktet af det sparede energiforbrug og den energirelaterede CO₂-emissionsfaktor:

$$E_{CO2} = \sum_i E_j(MJ) \cdot EF_{CO2,k} \quad (8)$$

Hvor E_{CO2} = CO₂-emission (kg), E (MJ) = energiforbrug (MJ), beregnet med formel 7), EF_{CO2} = CO₂-emissionsfaktoren (g/MJ, tabel 1), i = anløbsnr., j = skibs-ID, k = brændstoftype.

SO₂-emissioner

De sparede SO₂-emissioner beregnes som produktet af det sparede brændstofforbrug og svovlprocenten for det anvendte brændstof:

$$E_{SO_2} = \sum_i E_j(kg) \cdot F_{s_k}/100 \cdot 2 \quad (9)$$

Hvor E_{SO_2} = SO₂ emission (kg), E (kg) = brændstofforbrug (kg), beregnet med formel 4 og 5, F_s = svovlprocenten for det anvendte brændstof (tabel 1), $i = \dots$, j = skibs-ID, k = brændstoftype.

N₂O-emissioner

De sparede N₂O-emissioner beregnes som produktet af det sparede brændstofforbrug og den vægtrelaterede N₂O-emissionsfaktor:

$$E_{N_2O} = \sum_i E_j(kg) \cdot EF_{N_2O,k} \quad (10)$$

Hvor E_{N_2O} = N₂O emission (kg), E (kg) = brændstofforbrug (kg), beregnet med formel 5 og 6), EF_{N_2O} = N₂O-emissionsfaktor (g/kg, Tabel 1), $i = \text{anløbsnr}$, j = skibs-ID, k = brændstoftype.

CO₂-ækvivalent (CO_{2eq}) emissioner

De samlede drivhusgasemissionsbesparelser beregnes i CO₂-ækvivalenter som summen af de sparede CO₂-emissioner og de sparede CH₄- og N₂O-emissioner omregnet til CO₂-ækvivalenter baseret på drivhusgaspotentialerne for CH₄ og N₂O på henholdsvis 28 og 265 angivet af Myhre et al. (2013):

$$E_{CO_2eq} = E_{CO_2} + 28 \cdot E_{CH_4} + 265 \cdot E_{N_2O} \quad (11)$$

Hvor E_{CO_2eq} = CO_{2eq}-emission (g), E_{CH_4} = CH₄-emission (g), E_{N_2O} = N₂O-emission (g).

Brændstofforbrugs- og emissionsraterne beregnes for de enkelte skibe ud fra de beregnede samlede brændstofforbrug/emissioner og kajtiden for hvert skib. Emissionsraterne bruges som input til de efterfølgende beregninger af luftkvaliteten i OML-Multi-modellen. Denne model bruger også inputdata for skibsdimensioner (skorstens- og overbygningshøjder), udstødningsvolumenstrømme og -hastigheder, se Lansø et al. (2025) for yderligere beskrivelser.

4. Sparet brændstofforbrug og emissioner

4.1 Sparet brændstofforbrug og emissioner i alt

Tabel 2 viser det beregnede totale elforbrug om bord og den sparede mængde brændstof og emissioner for krydstogtskibe og færger, hvis skibene bruger landstrøm ved kaj i stedet for elektricitet produceret af skibets dieselmotorer.

For krydstogtskibe i Københavns Havn beregnes følgende procentvise besparelsesandele (angivet i parentes) for brændstofforbrug (94 %), SO₂ (92 %), NO_x (91 %), PM_{2,5} (97 %), CO₂ (94 %), CH₄ (100 %), N₂O (92 %) og CO_{2eq} (94 %).

Krydstogtskibenes meget store besparelsesandele for PM_{2,5} og CH₄ skyldes de meget store PM_{2,5}- og CH₄-emissioner der undgås fra hhv. de HFO-drevne krydstogtskibe (der udleder meget PM_{2,5} på trods af brugen af scrubber) og (de få) LNG-drevne krydstogtskibe i havnen.

For færger i Københavns Havn beregnes følgende procentvise besparelsesandele (angivet i parentes) for brændstofforbrug (6 %), SO₂ (8 %), NO_x (9 %), PM_{2,5} (3 %), CO₂ (6 %), CH₄ (0 %), N₂O (8 %) og CO_{2eq} (6 %).

For krydstogtskibe i Aarhus Havn beregnes følgende procentvise besparelsesandele (angivet i parentes) for brændstofforbrug (74 %), SO₂ (98 %), NO_x (79 %), PM_{2,5} (89 %), CO₂ (74 %), CH₄ (79 %), N₂O (74 %) og CO_{2eq} (74 %).

I Aarhus Havn er andelen af sparede SO₂- og PM_{2,5}-udledninger særligt høje for krydstogtskibe, fordi det effektive svovlindhold på 0,1 % i brændstoffet krydstogtskibene sparer er meget højere end svovlindholdet på 0,005 % i det MDO/MGO-brændstof færgerne sparer, og fordi der undgås meget store PM_{2,5}-emissioner fra de HFO-drevne krydstogtskibe.

For færger i Aarhus Havn beregnes følgende procentvise besparelsesandele (angivet i parentes) for brændstofforbrug (26 %), SO₂ (2 %), NO_x (21 %), PM_{2,5} (11 %), CO₂ (26 %), CH₄ (21 %), N₂O (26 %) og CO_{2eq} (26 %).

Tabel 2. Det beregnede totale elforbrug om bord og den sparede mængde brændstofforbrug og emissioner for krydstogtskibe og færger, hvis de bruger landstrøm ved kaj i stedet for elektricitet produceret af skibets dieselmotorer.

			Sparet brændstofforbrug og emissioner								
Havn	Skibstype	Elforbrug om bord	Brændstofforbrug		SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO _{2eq}
		MWh	Tons	GJ	kg	kg	kg	Tons	kg	kg	Tons
København	Krydstogtskibe	26009	5251	226781	7529	211678	9674	16032	19215	301	16650
	Færger	1611	345	14717	689	20275	309	1091	54	28	1099
	Total	27620	5596	241497	8219	231953	9983	17123	19269	329	17749
Aarhus	Krydstogtskibe	2942	596	24699	1192	33331	1349	1896	46	48	1910
	Færger	1020	215	9169	21	8747	165	679	12	17	684
	Total	3962	811	33868	1213	42078	1513	2576	59	65	2594

4.2 Sparede brændstofforbrug og emissioner for krydstogtskibe

Tabel 3 viser antallet af havneanløb, timer i havn og det beregnede totale elforbrug om bord og den sparede mængde brændstofforbrug og emissioner for krydstogtskibene, hvis de bruger landstrøm ved kaj i stedet for elektricitet produceret af skibets dieselmotorer.

Tabel 3. Antal havneanløb, timer i havn og det beregnede totale elforbrug om bord og den sparede mængde brændstofforbrug og emissioner for krydstogtskibene, hvis de bruger landstrøm ved kaj i stedet for elektricitet produceret af skibets dieselmotorer.

Emissioner for flytølgensens, hvis de bruger kerosen (kg)					Emissioner for flytølgensens produceret af kerosen (Emissioner)								
Port	Brændstofftype	Anløb No.	Timer i havn	Elforbrug om bord MWh	Sparet brændstofforbrug og emissioner								
					Brændstofforbrug Tons	SO ₂ GJ	NO _x kg	PM _{2.5} kg	CO ₂ Tons	CH ₄ kg	N ₂ O kg	CO _{2eq} Tons	
København	HFO	158	1853	14203	2882	117859	5763	155870	8202	9193	224	231	9260
København	LNG	36	516	7360	1487	71219	0	11622	603	4045	18920	0	4575
København	MDO/MGO	86	1354	4445	883	37703	1766	44186	869	2794	70	71	2814
København	Total	280	3722	26009	5251	226781	7529	211678	9674	16032	19215	301	16650
Aarhus	HFO	33	327	2025	413	16901	826	22695	1170	1318	32	33	1328
Aarhus	MDO/MGO	19	190	917	183	7798	365	10637	179	578	14	15	582
Aarhus	Total	52	517	2942	596	24699	1192	33331	1349	1896	46	48	1910

I Københavns Havn står de HFO-drevne krydstogtskibe for ca. 55 % af de sparede brændstof- og CO₂-emissioner i havnen (afledt af tabel 3), hvis OPS bruges i stedet for strøm produceret vha. skibenes dieselmotorer. For PM_{2,5} er emissionsbesparelserne 85 % på grund af de relativt store PM_{2,5}-emissioner der undgås fra de HFO-drevne krydstogtskibe, der udleder meget PM_{2,5} på trods af brugen af scrubber.

I Københavns Havn står de LNG-drevne skibe, primært på grund af deres størrelse, for næsten 30 % af det sparede brændstofforbrug og CO₂-udledningen i havnen, hvis OPS bruges i stedet for strøm produceret vha. dieselgeneratorer. For CH₄'s vedkommende er den procentvise andel af de samlede sparede emissioner 98 % fra de LNG-drevne skibe, på grund af den store CH₄-emission, der spares fra netop denne skibstype.

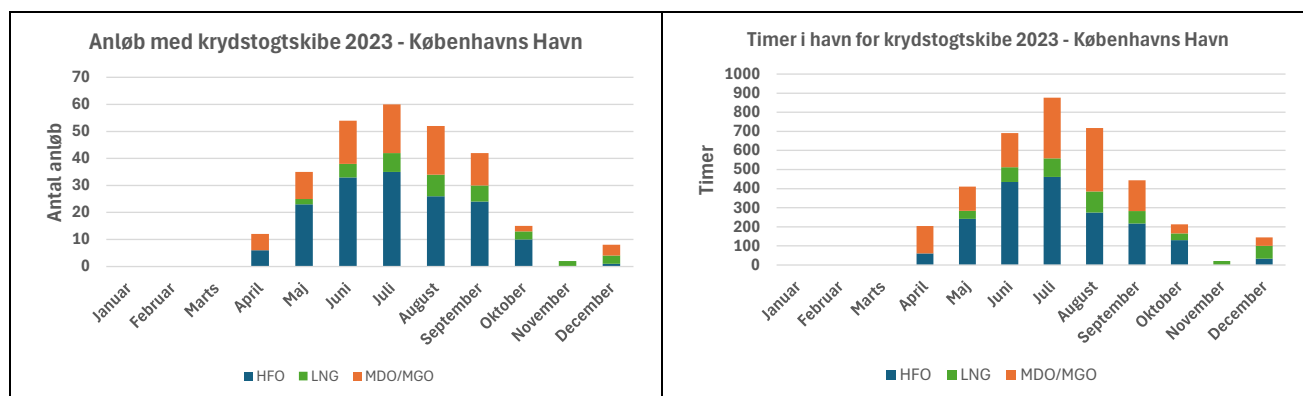
I Aarhus Havn står HFO-drevne skibe for ca. 70 % af det samlede sparede brændstofforbrug og emissionerne, når der skiftes til landstrøm, bortset fra PM_{2,5}. I dette tilfælde er det procentvise bidrag til de sparede emissioner 87 % på grund af de store emissioner, der undgås fra HFO-drevne skibe (afledt af tabel 3).

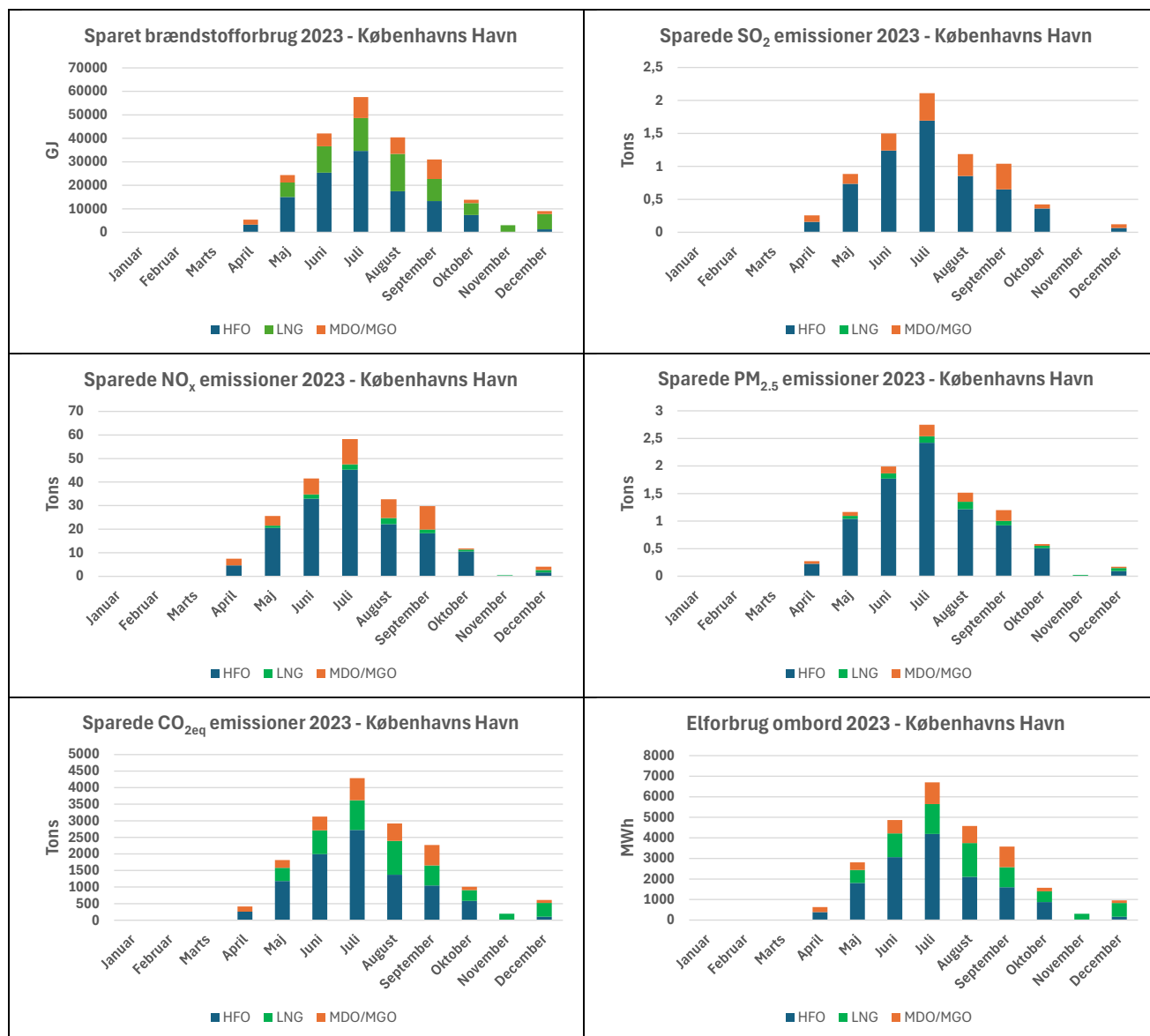
Figurene 4.1-4.4 viser antal havneanløb, timer i havn og i alt sparet brændstofforbrug og, SO₂-, NO_x-, PM_{2,5}- og CO_{2eq}-udledninger samt elforbruget om bord for krydstogtskibe i Københavns Havn og Aarhus Havn pr. måned i 2023.

Udviklingen i det sparede brændstofforbrug og udledninger fra krydstogtskibene, når de skifter til landstrøm, er ikke i alle tilfælde proportional med antallet af krydstogtskibe i årets måneder. Det skyldes, at den specifikke sammensætning af skibenes størrelse, alder og brændstoftype, og dermed de sparede emissioner, er specifik for hver måned og havn.

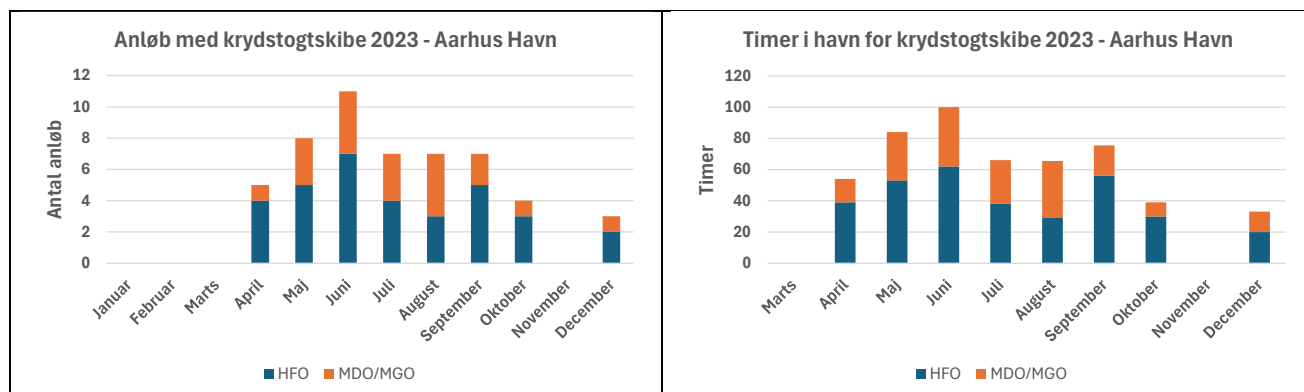
I begge havne er andelen af sparede PM_{2,5}-emissioner for HFO-drevne skibe, der skifter til landstrøm, højere end andelen af f.eks. sparet HFO-brændstofforbrug. Dette skyldes som tidligere nævnt de høje PM_{2,5}-emissioner, der kan spares ved at undgå brugen af HFO-brændstof sammenlignet med de sparede PM_{2,5}-emissioner ved at undgå brugen af MDO/MGO i begge havne og brugen af LNG i Københavns Havn.

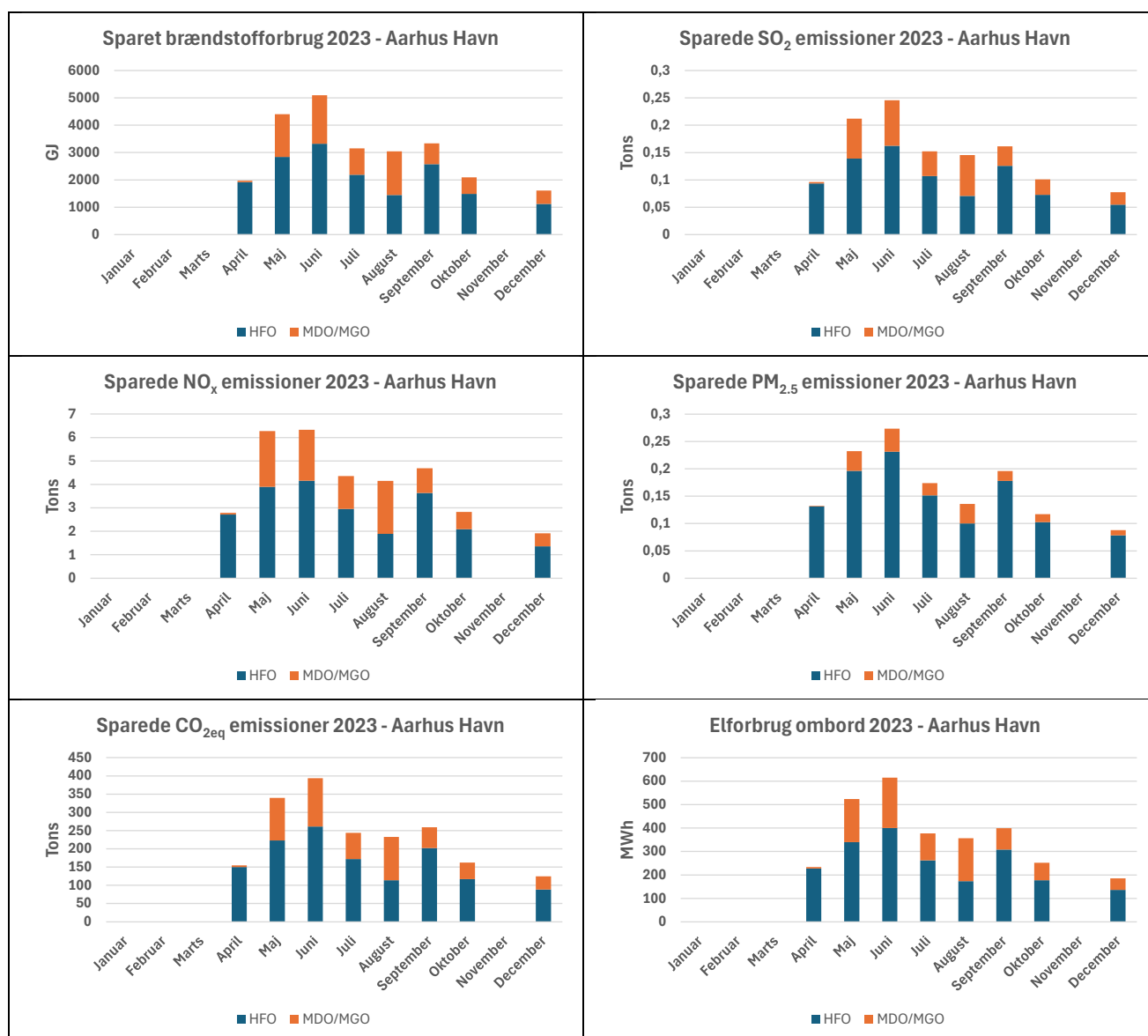
De sparede emissioner for LNG-drevne skibe, der skifter til landstrøm i Københavns Havn, er små for PM_{2,5} og omtrent nul for SO₂. Årsagen er som før nævnt de meget lave PM_{2,5}-emissioner ved forbrændingen af LNG og en ubetydelig mængde SO₂-emissioner, der stammer fra forbrændingen af MDO/MGO-pilotbrændstof i LNG-dual fuel-motorerne.





Figur 10. Antal havneanløb, timer i havn og sparet brændstofforbrug, SO₂-, NO_x-, PM_{2.5}- og CO_{2eq}-emissioner samt elforbrug ombord for krydstogtskibe i Københavns Havn i 2023.





Figur 11. Antal havneanløb, timer i havn og sparet brændstofforbrug, SO₂-, NO_x-, PM_{2,5}- og CO_{2eq}-emissioner samt elforbrug ombord for krydstogtskibe i Aarhus Havn i 2023.

4.3 Sparede brændstofforbrug og emissioner for færger

I Aarhus Havn er færgerne tilsluttet OPS under natophold. I Københavns Havn er færgerne tilsluttet OPS under hele deres ophold. Eneste undtagelse er som tidligere nævnt ved dårlige vejrforhold, der gør skibets position mindre stabil i forhold til OPS-tilslutning, udfald i OPS-systemet og ved sikkerhedsovelser i havnen, hvor redningsbådene er i vejen for, at OPS kan tilsluttes.

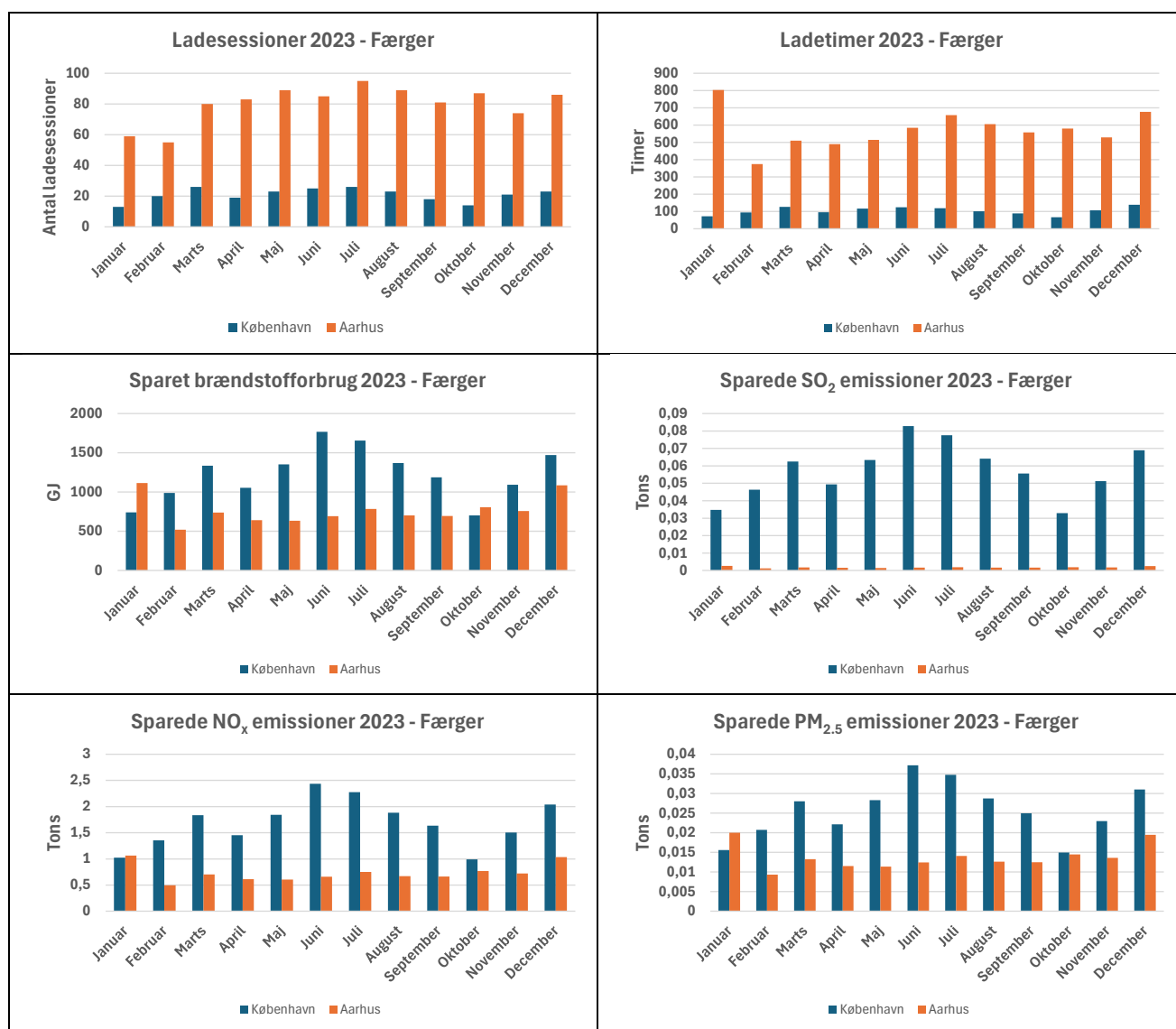
Figur 12 viser antallet af ladesessioner og ladetimer samt det sparede brændstofforbrug og SO₂-, NO_x-, PM_{2,5}- og CO_{2eq}-udledningerne samt elforbruget om bord for færger i Københavns Havn og Aarhus Havn pr. måned i 2023.

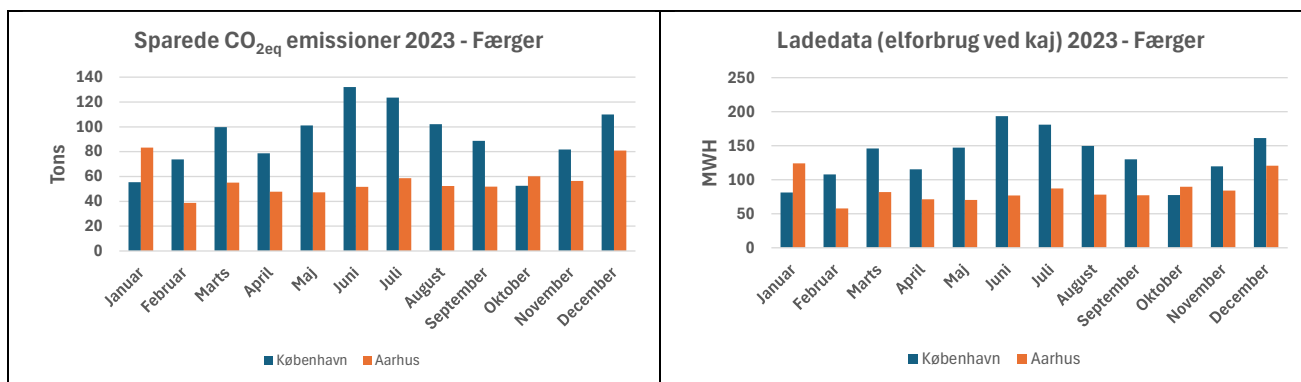
Færgerne i Aarhus Havn har flere ladesessioner og ladetimer end færgerne i Københavns Havn, men omvendt er det sparede brændstofforbrug og de sparede emissioner størst for færgerne i Københavns Havn, fordi disse færger bruger mest landstrøm under deres havneophold, og fordi svovlindholdet i det benyttede MDO/MGO-brændstof, og de deraf afledte SO₂- og PM_{2,5}-emissionsfaktorer, samt NO_x-emissionsfaktorerne

er størst for færgerne i København. Det sparede brændstofforbrug og de sparede CO_{2eq}-, PM_{2,5}-, NO_x-, SO₂-, og CO_{2eq}-emissioner er hhv. 1,6, 1,6, 1,9, 2,3 og 32 gange større for færger i Københavns Havn sammenlignet med færger i Aarhus Havn.

Den relative andel af den sparede SO₂-udledning er særlig lille for færger i Aarhus Havn. Svovlindholdet i det brændstof, som færgerne i Aarhus Havn sparer, er 0,005 %, hvilket er meget lavere end svovlindholdet på 0,1 % i det brændstof færgerne sparer i Københavns Havn.

Den relative andel af den sparede SO₂-udledning er særlig stor for færger i Københavns Havn, fordi svovlindholdet i det brændstof, som færgerne i Københavns Havn sparer, er 0,1 %, hvilket er meget større end svovlindholdet på 0,005 % i det brændstof færgerne sparer i Aarhus Havn.





Figur 12. Antal ladesessioner og ladetimer, det sparede brændstofforbrug og SO₂-, NO_x-, PM_{2,5}- og CO_{2eq}-emissioner, samt elforbruget om bord for færger i Københavns Havn og Aarhus Havn opgjort pr. måned i 2023.

5. Konklusion

Denne artikel præsenterer det maksimale potentiale for emissionsbesparelser i Københavns Havn og Aarhus Havn for en situation, hvor alle færger og krydstogtskibe modtager landstrøm i stedet for at producere elektriciteten med deres egne dieselmotorer under kajopholdet.

For krydstogtskibe er elforbruget ved kaj beregnet ud fra dieselgeneratoreffekt som funktion af BT og skibets opholdstid ved kaj. For færger er elforbruget ved kaj direkte oplyst af de to havne. Emissionerne er herefter beregnet for hvert enkelt skib som produktet af elforbruget og sammenhørende emissionsfaktorer.

I Københavns Havn udgør de beregnede emissionsbesparelser for krydstogtskibe langt de største dele af de samlede beregnede emissionsbesparelser for krydstogtskibe og færger i havnen. For krydstogtskibene beregnes følgende procentvise besparelsesandele (angivet i parentes) for brændstofforbrug (94 %), SO₂ (92 %), NO_x (91 %), PM_{2,5} (97 %), CO₂ (94 %), CH₄ (100 %), N₂O (92 %) og CO_{2eq} (94 %). Krydstogtskibenes meget store besparelsesandele for PM_{2,5} og CH₄ skyldes de meget store PM_{2,5}- og CH₄-emissioner der undgås fra hhv. de HFO-drevne og (de få) LNG-drevne krydstogtskibe, når landstrøm bruges.

Også i Aarhus Havn udgør de beregnede emissionsbesparelser for krydstogtskibe langt de største dele af de samlede beregnede emissionsbesparelser for krydstogtskibe og færger i havnen. For krydstogtskibene beregnes følgende procentvise besparelsesandele (angivet i parentes) for brændstofforbrug (74 %), SO₂ (98 %), NO_x (79 %), PM_{2,5} (89 %), CO₂ (74 %), CH₄ (79 %), N₂O (74 %) og CO_{2eq} (74 %). I Aarhus Havn er andelen af sparede SO₂- og PM_{2,5}-udledninger særligt høje for krydstogtskibe. Dette skyldes, at det effektive svovlindhold på 0,1 % i brændstoffet krydstogtskibene sparer, er meget højere end svovlindholdet på 0,005 % i det MDO/MGO-brændstof færgerne sparer, når der bruges landstrøm.

Ved projektperiodens afslutning blev faktiske forbrugstal leveret af Aarhus Havn for tre krydstogtskibe, hvilket har gjort det muligt at sammenligne det faktiske og det beregnede elforbrug i disse tre tilfælde.

For krydstogtskibene Aidabella, Rotterdam og Aidanova angiver Aarhus Havn et aflæst OPS-elforbrug på 4,5, 6,5 og 8 MWh pr. time. Det beregnede OPS-elforbrug i dette projekt for de tre skibe er hhv. 6,1 MWh, 8,7 MWh og 15,7 MWh pr. time, hvilket er hhv. 35 %, 33 % og 96 % højere end det aflæste OPS-elforbrug.

Forskellene mellem målt og beregnet elforbrug for de tre skibe tyder på en stor usikkerhed ved at beregne elforbruget med den anvendte metode, og at de beregnede sparede brændstofforbrug og emissioner sandsynligvis er for høje i projektet. Antallet af målte OPS-elforbrug er dog for lavt til at forskellene mellem målt og beregnet elforbrug kan bruges til at justere de beregnede resultater for sparet brændstofforbrug og emissioner i projektet.

Det mest hensigtsmæssige er, at målte data for OPS-forbruget kan oplyses for alle skibe, der modtager landstrøm ved kaj. I denne situation bliver de beregnede sparede brændstofforbrug og emissioner så præcise

som mulige. Et noget større antal end tre målinger vil dog også kunne bruges til at justere de beregnede resultater for sparet brændstofforbrug og emissioner, og dermed kunne der opnås en større præcision af de beregnede resultater i projektet.

På grund af manglende data er der heller ikke taget højde for tidsforsinkelsen mellem ankomst til kaj og tilsluttet OPS-forbindelse for krydstogtskibene i dette projekt. Udeladelsen af denne tidsforsinkelse i beregningerne bidrager også til en overestimering af de sparede brændstofforbrug og emissioner i projektet.

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).

Christensen, 2024: Personlig kommunikation, Jens Christensen, MAN Energy Solutions.

Fogh, 2024: Ladedata for færger i Københavns Havn, leveret af Copenhagen Malmö Port, Jacob Fogh.

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

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/ThirdGreenhouseGasStudy/GHG3ExecutiveSummaryandReport.pdf>.

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

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, S.S., Winther, M., Løfstrøm, P., Ketzler, 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. <https://dce2.au.dk/pub/SR413.pdf>.

Kristensen, F., 2013: Unpublished data material from Mols-Linjen.

Kruse, C. 2015: Data leveret af Samsø Rederi, Carsten Kruse.

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

MAN Energy Solutions, 2024: Data tilsendt af Isa Alkan, ELIM – Marine Project Engineering, København.

Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestad, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Nielsen, 2022: Data leveret af Molslinjen, Dan Nielsen.

Nørgaard, 2024a: Anløbsdata for krydstogtskibe i 2023 Københavns Havn, Aarhus Havn, Stockholm Havn og Helsinki Havn, leveret af Copenhagen Malmö Port, Gert Nørgaard.

Nørgaard, 2024b: Ladedata for færger i Aarhus Havn, leveret af Copenhagen Malmö Port, Gert Nørgaard.

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

Winther, M. 2024: Danish emission inventories for road transport and other mobile sources. Inventories until 2022. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 150 pp. Scientific Report No. 624. Available at: https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Videnskabelige_rapporter_600-699/SR624.pdf.