



REDUKTIONSPOTENTIALER FOR LUFTFORURENING FRA NATIONAL SØFART I DANMARK VED RETROFIT AF SCR OG PARTIKELFILTRE

Betydning for helbredseffekter og tilhørende eksterne omkostninger

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 464

2021



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

REDUKTIONSPOTENTIALER FOR LUFTFORURENING FRA NATIONAL SØFART I DANMARK VED RETROFIT AF SCR OG PARTIKELFILTRE

Betydning for helbredseffekter og tilhørende eksterne omkostninger

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 464

2021

Steen Solvang Jensen
Morten Winther
Jørgen Brandt
Lise M. Frohn

Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 464
Titel:	Reduktionspotentialer for luftforurening fra national søfart i Danmark ved retrofit af SCR og partikelfiltre
Undertitel:	Betydning for helbredseffekter og tilhørende eksterne omkostninger
Forfattere:	Steen Solvang Jensen, Morten Winther, Jørgen Brandt, Lise M. Frohn
Institution:	Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	November 2021
Redaktion afsluttet:	Oktober 2021
Faglig kommentering:	Camilla Geels
Kvalitetssikring, DCE:	Vibeke Vestergaard Nielsen
Sproglig kvalitetssikring:	Vibeke Vestergaard Nielsen
Finansiel støtte:	Miljøstyrelsens Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP)
Bedes citeret:	Jensen, S.S., Winther, M., Brandt, J., Frohn, L.M., 2021. Reduktionspotentialer for luftforurening fra national søfart i Danmark ved retrofit af SCR og partikelfiltre - Betydning for helbredseffekter og tilhørende eksterne omkostninger. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 43 s. - Videnskabelig rapport nr. 464. http://dce2.au.dk/pub/SR464.pdf
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Rapporten er et delprodukt i forbindelse med Fyrtårnsprojektet, 'Maritime Emissionsløsninger i Kystnære Farvande' finansieret under Miljøstyrelsens Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP). Aarhus Universitet har gennemført en konsekvensanalyse for helbredseffekter og samfundsmæssige omkostninger for et scenarie baseret på et maksimum scenarie, hvor alle skibe, hvor teknisk muligt, under national søfart tænkes udstyret med projektets demonstrerede emissionsteknologi.
Emneord:	Luftforurening, søfart, SCR, partikelfiltre, helbredseffekter, eksterne omkostninger
Layout:	Majbritt Ulrich
Foto forside:	Billede af færgen M/F Isefjord mellem Rørvig og Hundested. Foto: Teknologisk Institut.
ISBN:	978-87-7156-630-7
ISSN (elektronisk):	2244-9981
Sideantal:	43
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som http://dce2.au.dk/pub/SR464pdf

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	6
Baggrund og formål	6
Undersøgelsen	6
Hovedkonklusioner	7
Summary in English	9
Background and purpose	9
The study	9
Main conclusions	10
1 Overordnet metode	12
1.1 Emissioner fra national søfart	12
1.2 Potentiale for emissionsreduktion	12
1.3 Koncentrationer i reduktionsscenariet	12
1.4 Helbredseffekter og eksterne omkostninger	13
2 Metode for beregning af helbredseffekter og eksterne omkostninger	14
2.1 EVA-systemet	14
3 NO_x- og PM_{2,5}-emissioner for national søfart i Danmark i 2018	23
3.1 Emissionsopgørelsen for national søfart	23
3.2 Aktivitetsdata for færger	23
3.3 Aktivitetsdata for øvrig national søfart	25
3.4 Emissionsfaktorer	26
3.5 Beregningsmetode	26
3.6 Emissionsresultater	27
3.7 Rumlig fordeling af emissionerne	28
4 Potentiale for emissionsreduktion	29
4.1 Målinger af Teknologisk Institut	29
4.2 Emissioner i reduktionsscenarie	30
5 Koncentrationer i reduktionsscenariet	31
5.1 Beregning af koncentrationsbidrag med DEHM	31
5.2 Geografisk fordeling af koncentrationsforskelle	31
6 Helbredseffekter og eksterne omkostninger	34
6.1 Reduktion af helbredseffekter	34
6.2 Reduktion af eksterne omkostninger	35
6.3 Enhedspriser for national søfart	35
7 Diskussion af usikkerheder	37
7.1 Hovedelementerne i EVA-systemet	37
7.2 Usikkerheder i forbindelse med national søtransport	37
Referencer	39

Forord

Nærværende rapport er et delprodukt i forbindelse med Fyrtårnsprojektet, "Maritime Emissionsløsninger i Kystnære Farvande" finansieret under Miljøstyrelsens Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP).

Projektets formål er "at produktmodne, integrere, demonstrere og validere fuldskalaløsninger til reduktion af partikelemission og NO_x fra eksisterende skibe i kystnære farvande".

I projektet afprøves to forskellige emissionsbegrænsende løsninger om bord på to forskellige danske fartøjer, som sejler i kystnære farvande.

I projektet har to danske teknologileverandører demonstreret deres teknologi i fuld skala på skibe. Exilator ApS har leveret integrerede partikelfilterløsninger til hoved- og hjælpemotorerne på færgen M/F Isefjord, som sejler mellem Hundested og Rørvig. Purefi A/S har leveret en kombineret og svovltolerant løsning med både partikelfiltre og urea-baserede NO_x katalysatorer (SCR) til fartøjet World Mistral, der fragter personale og gods for vindmølleindustrien.

Teknologisk Institut har gennemført emissionsmålinger, mens Aarhus Universitet har gennemført en konsekvensanalyse for helbredseffekter og samfundsmæssige omkostninger for et scenarie baseret på et maksimum scenarie, hvor alle skibe under national søfart, tænkes udstyret med den demonstrerede emissionsteknologi, hvor det er teknisk muligt. National søfart er underopdelt i større færgeruter, mindre færges (ø- og genvejsfærges), øvrig national søfart og godstransport mellem Danmark og Grønland/Færøerne.

Projektet ledes af Teknologisk Institut (Teknologisk Institut, 2021). Herudover har følgende været partnere i projektet: Exilator ApS, Amminex Emissions Technology A/S (udtrådt oktober 2018), Purefi A/S, Hundested-Rørvig Færgefart A/S, Partrederiet Sundbusserne (udtrådt 2020), World Marine Offshore, Aarhus Universitet, Danske Rederier, og Danske Maritime. Projektet startede i 2017 og afsluttes i starten af 2022.

Sammenfatning

Baggrund og formål

Nærværende rapport er et delprodukt i forbindelse med Fyrtårnsprojektet, 'Maritime Emissionsløsninger i Kystnære Farvande' finansieret under Miljøstyrelsens Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP), og ledet af Teknologisk Institut.

Aarhus Universitet har gennemført en konsekvensanalyse for helbredseffekter og samfundsmæssige omkostninger for et scenarie baseret på et maksimumscenarie, hvor alle skibe under national søfart tænkes at få eftermonteret den i projektet demonstrerede emissionsteknologi, hvor det er teknisk muligt. Reduktionsteknologien omfatter partikelfiltre og NO_x-katalysator også kaldet SCR – Selective Catalytic Reduction. NO_x er kvælstofoxider.

National søfart er underopdelt i større færgeruter, mindre færger som ø- og genvejsfærger, øvrig national søfart samt godstransport mellem Danmark og Grønland/Færøerne.

Undersøgelsen

Emissioner fra national søfart i 2018

Udgangspunktet for at kunne vurdere potentialet for reduktion af luftforurening fra skibe i kystnære farvande ved emissionsbegrænsende løsninger er den nationale emissionsopgørelse for national søfart. Emissionen er beregnet ud fra aktivitetsdata, emissionsfaktorer og beregningsmetoder, og emissionerne er geografisk fordelt på danske farvande med den såkaldte SPREAD-model.

Potentiale for emissionsreduktion

Reduktionspotentialet tager udgangspunkt i de emissionsmålinger, som Teknologisk Institut har udført på to fartøjer af den demonstrerede reduktionsteknologi med partikelfilter og NO_x-katalysator (SCR). Resultaterne herfra er generaliseret til et potentiale for reduktion af emissioner fra national søtransport. Scenariet for reduktion af emissioner fra national søtransport er et maksimumscenarie, hvor det forudsættes at alle skibe, som i princippet kunne bruge reduktionsteknologien, ville gøre det.

I emissionsreduktionsberegningerne er det antaget, at NO_x-emissionerne reduceres med 80% for skibe som bruger MDO (Marine Diesel Oil)/MGO (Marine Gasoil) og HFO (Heavy Fuel Oil) i national søfart.

For partikelemissioner er det antaget, at det er muligt at reducere med 99% med partikelfilteret eftermonteret set i forhold til emissionerne fra motoren uden filter påmonteret ved anvendelse af MDO/MGO diesel med et svovlindhold på 50 ppm.

For tung olie (HFO) med højt svovlindhold vurderes det ikke at være realistisk at anvende partikelfiltre pga. problemer med aske og sod, der skabes ved forbrændingen og fører til tilstopning af partikelfilteret. Partikelemissionskonsekvenser ved brug af filtre og tung olie medtages derfor ikke i de efterfølgende emissionsreduktionsberegninger, hvilket gælder for godstransport

til Grønland/Færøerne. Dette betyder, at den samlede partikelreduktion ikke bliver 99%, men 52%, når der tages hensyn til dette.

Koncentrationer i reduktionsscenarie

Scenariet for emissionsreduktioner er implementeret i luftkvalitetsberegninger med DEHM (Danish Eulerian Hemispheric Model) for at kunne beregne koncentrationsforskellen mellem basissituationen og reduktionsscenariet. Koncentrationsforskellen benyttes i de efterfølgende beregninger med EVA-systemet (Economic Valuation of Air pollution).

Helbredseffekter og eksterne omkostninger

Reduktion i helbredseffekter og tilhørende eksterne omkostninger som følge af reduktionsscenariet for national søtransport er beregnet med EVA-systemet.

De omkostninger, der fremkommer ved økonomisk værdisætning af helbredseffekter af luftforurening, kaldes for indirekte omkostninger eller eksternaliteter (eksterne omkostninger). Det kan også beskrives som de samfundsmæssige omkostninger ved luftforurening.

Hovedkonklusioner

Emissioner fra national søtransport

De samlede NO_x- og PM_{2,5}-emissioner fra national søfart i 2018 er hhv. 11.939 tons og 277 tons. PM_{2,5} er partikler under 2,5 mikrometer i diameter.

De samlede NO_x- og PM_{2,5}-emissioner fra national søfart udgør hhv. 10% og 1,6% af de totale NO_x og PM_{2,5} emissioner for alle emissionskilder i den nationale emissionsopgørelse for 2018.

Potentiale i reduktionsscenarie

De forudsatte procentvise emissionsreduktioner svarer til samlede emissionsbesparelser på 9.541 tons NO_x og 144 tons PM_{2,5} i 2018.

Reduktion i helbredseffekter

De sparede helbredseffekter i form af dødelighed og sygelighed ved reduktionsscenariet for national søtransport er underopdelt i "Hele Europa" (inkl. Danmark) og "Kun Danmark".

I Danmark vil reduktionsscenariet potentielt kunne spare 17 for tidlige dødsfald om året, mens det samlede antal i hele Europa inkl. Danmark er 98 for tidlige dødsfald i 2018. De 17 for tidlige dødsfald i Danmark, som kan spares i reduktionsscenariet, udgør omkring 1,4% af antallet af for tidlige dødsfald pga. emissioner fra alle danske kilder. De 98 for tidlige dødsfald i Europa inkl. Danmark udgør tilsvarende omkring 3,2% af Danmarks bidrag til Danmark og udland. Herudover vil der være en reduktion i sygelighed.

Reduktion i eksterne omkostninger af helbredseffekter

De samlede sparede eksterne omkostninger af helbredseffekter fra luftforurening er 332 mio. kr. om året i reduktionsscenariet for national søtransport, mens det er 1,7 mia. kr. om året i hele Europa inkl. Danmark. 19% af gevinsten er i Danmark, mens 81% af gevinsten er i det øvrige Europa.

Langt den største del skyldes reduktion i partikler.

Usikkerheder

Hvert skridt fra emissioner til helbredseffekter og omkostninger er forbundet med usikkerhed. Dette er nærmere beskrevet i rapporten. En tysk undersøgelse vurderer, at den samlede usikkerhed formentligt er omkring $\pm 50\%$ (Lelieveld et al., 2019). Det er DCE's faglige skøn, at en usikkerhed i denne størrelsesorden er i god overensstemmelse med den usikkerhed, man må regne med i denne type studier.

Summary in English

Background and purpose

This report is a deliverable under the Lighthouse Project, 'Maritime Emission Solutions in Coastal Waters' funded under the Danish Environmental Protection Agency's Development and Demonstration Programme (MUDP), and led by the Danish Technological Institute.

Aarhus University has carried out an impact assessment on health effects and related societal costs for a scenario based on a maximum scenario with the assumption that all ships under national sea traffic are retrofitted with the emission technology demonstrated in the project, where it is technically possible. The reduction technology includes particle filters and NO_x catalysts also called SCR – Selective Catalytic Reduction. NO_x denotes nitrogen oxides.

National sea traffic is subdivided into major ferry routes, smaller ferries such as island and short cut ferries, other national shipping, and freight transport between Denmark and Greenland/Faroe Islands.

The study

Emissions from national sea traffic in 2018

The starting point for assessing the potential for reduction of air pollution from ships in coastal waters by emission reduction solutions is based on the Danish National Emission Inventory for national sea traffic. The emissions are calculated based on activity data, emission factors and calculation methods, and emissions are geographically distributed in Danish waters with the so-called SPREAD model.

Potential for emission reduction

The reduction potential is based on the emission measurements carried out by the Danish Technological Institute on two vessels of the demonstrated reduction technology with particle filter and NO_x catalyst (SCR). Its results have been generalised to the potential for reducing emissions from national sea traffic. The scenario for reducing emissions from national sea traffic is a maximum scenario, assuming that all ships that in principle could use the reduction technology would do so. In the emission reduction calculations, it is assumed that NO_x emissions are reduced by 80% for ships using MDO (Marine Diesel Oil)/MGO (Marine Gas Oil) and HFO (Heavy Fuel Oil) in national sea traffic. For particulate emissions, it is assumed that it is possible to reduce by 99% with the particulate filter retrofitted in relation to the emissions from the engine without a filter for MDO/MGO diesel with a sulphur content of 50 ppm.

For heavy oil (HFO) with high sulphur content, it is not considered realistic to use particulate filters due to problems with ash and soot created by combustion and leading to clogging of the particulate filter. Particle emission consequences using filters and heavy oil are therefore not included in the subsequent emission reduction calculations, which applies to freight transport to Greenland/Faroe Islands. This means that the overall particle emission reduction will not be 99% but 52% when this is accounted for.

Concentrations in reduction scenario

The emission reduction scenario is implemented in air quality calculations with DEHM (Danish Eulerian Hemispheric Model) in order to calculate the concentration difference between the base situation and the reduction scenario. The difference in concentrations is used in subsequent health calculations with the Economic Valuation of Air pollution (EVA) system.

Health effects and external costs

Reductions in health effects and associated external costs resulting from the reduction scenario for national sea traffic are calculated with the EVA system. In economic terms, the costs associated with health effects of air pollution are referred to as indirect costs or externalities (external costs). It can also be described as the societal cost of air pollution.

Main conclusions

Emissions from national sea traffic

Total NO_x and PM_{2.5} emissions from national sea traffic in 2018 are 11,939 tonnes and 277 tonnes, respectively. PM_{2.5} are particles below 2.5 micrometres in diameter.

Total NO_x and PM_{2.5} emissions from national sea traffic represent 10% and 1.6% of total NO_x and PM_{2.5} emissions, respectively, for all emission sources in the 2018 National Emissions Inventory.

Potential in reduction scenario

The assumed percentage emission reductions correspond to total emission reductions of 9,541 tonnes of NO_x and 144 tonnes of PM_{2.5} in 2018.

Reduction in health effects

The health effects saved in terms of mortality and morbidity in the reduction scenario for national sea traffic are subdivided across 'Europe' (including Denmark) and 'Denmark Only'.

In Denmark, the reduction scenario could potentially save 17 premature deaths per year, while the total number across Europe including Denmark is 98 premature deaths in 2018.

The 17 premature deaths in Denmark that can be saved in the reduction scenario correspond to approx. 1.4% of the total number of premature deaths due to emissions from all Danish sources. The 98 premature deaths in Europe including Denmark similarly corresponds to approx. 3.2% of Denmark's contribution to Europe including Denmark.

In addition, there will be a reduction in morbidity.

Reduction in external costs of health effects

The total reduction in external costs of health effects from air pollution are DKK 332 million per year in the reduction scenario for national sea traffic, while it is DKK 1.7 billion per year for Europe including Denmark.

19% of the gains are in Denmark, while 81% of the gains are in the rest of Europe. The vast majority of gains is due to reduction in particles.

Uncertainties

Every step from emissions to health effects and costs is associated with uncertainty. This is described in more details in the report. A German study estimates that overall uncertainty is probably approx. $\pm 50\%$ (Lelieveld et al., 2019). It is DCE's assessment that uncertainty of this magnitude is in line with the uncertainty to be expected in this type of study.

1 Overordnet metode

1.1 Emissioner fra national søfart

Udgangspunktet for at kunne vurdere potentialet for reduktion af luftforurening fra skibe i kystnære farvande ved emissionsbegrænsende løsninger er den nationale emissionsopgørelse for national søfart. Emissionen er beregnet ud fra aktivitetsdata, emissionsfaktorer og beregningsmetoder, og emissionerne er geografisk fordelt på danske farvande med den såkaldte SPREAD-model.

Emissionsopgørelsen for national søfart er opdelt i større færgeruter, mindre færger (ø- og genvejsfærger), øvrig national søfart og godstransport mellem Danmark og Grønland/Færøerne.

Emissionsopgørelsen er nærmere beskrevet i kapitel 3.

1.2 Potentiale for emissionsreduktion

Reduktionspotentialet tager udgangspunkt i de emissionsmålinger, som Teknologisk Institut har udført på to fartøjer af den demonstrerede reduktionsteknologi med partikelfilter og NO_x-katalysator (SCR). Resultaterne herfra er generaliseret til et potentiale for reduktion af emissioner fra national søtransport. Scenariet for reduktion af emissioner fra national søtransport er et maksimumscenarie, hvor det forudsættes at alle skibe, som i princippet kunne bruge reduktionsteknologien, ville gøre det.

For tung olie (HFO) med højt svovlindhold vurderes det ikke at være realistisk at anvende partikelfiltre pga. problemer med aske og sod, der skabes ved forbrændingen og fører til tilstopning af partikelfilteret. Partikelemissionskonsekvenser ved brug af filtre og tung olie medtages derfor ikke i de efterfølgende emissionsreduktionsberegninger, hvilket gælder for godstransport til Grønland/Færøerne.

Metoden er mere detaljeret beskrevet i kapitel 4.

1.3 Koncentrationer i reduktionsscenariet

Scenariet for emissionsreduktioner er implementeret i luftkvalitetsberegninger med DEHM for at kunne beregne koncentrationsforskellen mellem basis-situationen og reduktionsscenariet. Koncentrationsforskellen benyttes i de efterfølgende beregninger med EVA-systemet.

Luftkvalitetsberegningerne er nærmere beskrevet i kapitel 5, herunder den geografiske fordeling af koncentrationsforskellene.

1.4 Helbredseffekter og eksterne omkostninger

Reduktion i helbredseffekter og tilhørende eksterne omkostninger som følge af reduktionsscenariet for national søtransport er beregnet med EVA-systemet.

Resultaterne er nærmere beskrevet i kapitel 6, og EVA-systemet er beskrevet i kapitel 2.

2 Metode for beregning af helbredseffekter og eksterne omkostninger

Dette kapitel beskriver EVA-systemet, hvad det kan anvendes til, samt de metoder og data, som det er baseret på.

2.1 EVA-systemet

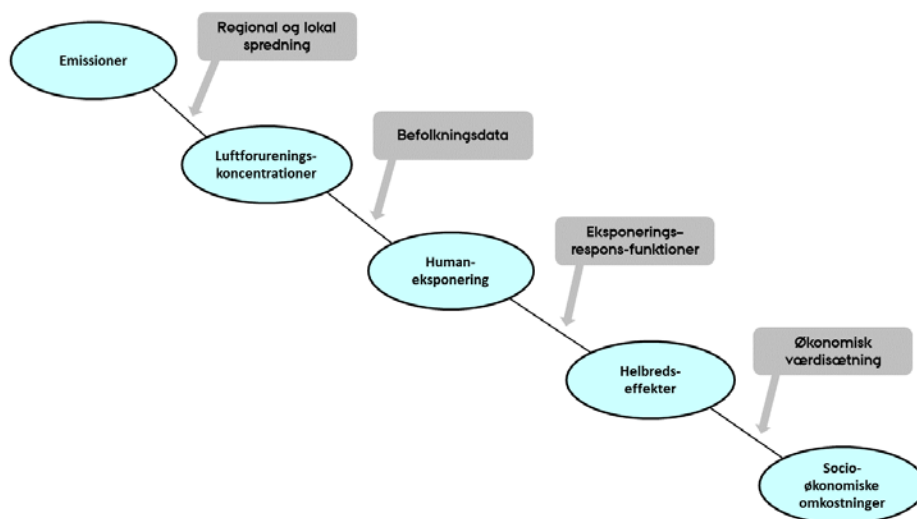
EVA-systemet (Economic Valuation of Air pollution) kan bruges til at undersøge hvilke kilder, der bidrager mest til helbredseffekter fra luftforurening i et område. Ud over en kvantificering af helbredseffekterne beregnes den indirekte (eller eksterne) omkostning af disse effekter, sådan at effekterne fra forskellige typer af kilder kan sammenlignes direkte med en fælles enhed (penge).

I nærværende projekt er EVA-systemet anvendt til at beregne helbredseffekter og eksterne omkostninger af luftforurening fra national søtransport. Version 5.2 af EVA-systemet er anvendt (Andersen et al., 2019).

Impact-pathway metoden

Det integrerede modelsystem, EVA-systemet (Brandt et al., 2011a,b; 2013a,b; 2016a,b; Andersen et al., 2019) er baseret på den såkaldte "impact-pathway" metode, og har til formål at opgøre helbredsrelaterede eksterne omkostninger fra luftforurening, og estimere hvordan helbredsomkostningerne er fordelt på de forskellige typer af luftforurening og emissionssektorer.

Det grundlæggende princip bag EVA-systemet er at bruge de bedst mulige videnskabelige metoder i alle leddene af "impact-pathway" - kæden (se Figur 2.1) baseret på den bedst tilgængelige viden og data.



Figur 2.1. Et skematisk diagram over EVA-systemets bestanddele baseret på "impact-pathway" - metoden. En emission fra en forurenende kilde et bestemt sted resulterer (via atmosfærisk transport og kemiske omdannelser) i en fordeling af koncentrationen i luften, som sammen med detaljerede befolkningsdata kan bruges til at beregne eksponeringen af befolkningen. Effekter på menneskers helbred findes ved brug af eksponerings-responsfunktioner og til sidst værdisættes de individuelle effekter for at finde de totale eksterne omkostninger.

”Impact-pathway” - kæden dækker alle leddene fra udslip af kemiske stoffer fra specifikke kilder, over spredning og kemisk omdannelse i atmosfæren, eksponering af befolkningen, beregning af helbredseffekter, til den økonomiske værdisætning af disse helbredseffekter. Den økonomiske værdisætning af effekter kaldes også for indirekte omkostninger eller eksternaliteter (eksterne omkostninger). Der er direkte omkostninger forbundet med produktionen af fx elektricitet i form af opførelse af kraftværker og forbrug af kul, hvorimod de helbredsrelaterede omkostninger fra luftforureningen, der kommer fra kraftværket, ikke er relateret direkte til produktion og forbrug, og derfor betegnes som indirekte eller eksterne omkostninger. De indirekte omkostninger er knyttet til fx sygdom, for tidlige dødsfald eller sygedage med deraf tabt arbejdsfortjeneste eller omkostninger for samfundet i form af tabt omsætning eller øgede sygehusomkostninger.

Baggrundsforurening med høj geografisk opløsning

I EVA-systemet indgår luftkvalitetsmodeller til at estimere, hvor meget emissionskilderne i Danmark samt udlandet bidrager til baggrundskoncentrationen. De anvendte modeller er den regionale model DEHM (Danish Eulerian Hemispheric Model) (Christensen, 1997; Brandt et al., 2012) og bybaggrundsmodellen UBM (Urban Background Model) (Berkowicz, 2002; Brandt et al., 2001), som har høj geografisk opløsning.

I nærværende projekt er kun anvendt DEHM, som har en opløsning på 5,6 km x 5,6 km, som vurderes at være en tilstrækkelig geografisk opløsning, da emissionerne fra national søfart er over vand, og afstand mellem emission og befolkning derfor er relativt stor. Der vil derfor være lille forskel mellem luftkvalitetsberegninger med forskellig geografisk opløsning pga. fortyndingen over større afstande.

Der er anvendt samme modelopsætning af DEHM og tilhørende internationale og nationale emissioner og meteorologi som i modelberegninger gennemført for 2018 i Det nationale overvågningsprogram for luftkvalitet under NOVANA (Ellermann et al., 2020).

Udenlandske emissioner

Emissionsdata til DEHM er baseret på en række europæiske og globale emissionsopgørelser, da modellen dækker den nordlige halvkugle. Emissionsgrundlaget for Europa er baseret på de sidst tilgængelige emissionsdata fra EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme; www.emep.int).

Der indgår en del naturlige emissioner i DEHM. Isopren og mono-terpener fra vegetation, som er flygtige organiske forbindelser (NMVOC) i gasform, og som spiller en rolle for dannelse af ozon, samt for dannelsen af sekundære organiske partikler. NO_x-emissioner, som dannes i atmosfæren ved lynudladninger, og emissioner af kvælstofforbindelser fra bakterielle processer i jord, har betydning for dannelse af sekundære partikler i atmosfæren i form af ammoniumpartikler og nitratpartikler. Emissioner fra skovbrande og saltpartikler fra havoverflader indgår også. En beskrivelse af de naturlige emissioner i DEHM er givet i Brandt et al. (2012).

Danske emissioner

DEHM-beregninger for Danmark er baseret på 1 km x 1 km emissionsdata, som dækker Danmark for alle emissionsklasser for 2018 beregnet med SPREAD-emissionsmodellen version 2.0 (Plejdrup & Gyldenkerne, 2018).

De nationale emissionsopgørelser omfatter summen af emissioner udledt i hele Danmark for en lang række kilder underopdelt i såkaldte SNAP-koder. SNAP er en international nomenklatur for kildetyper til luftforurening – Selected Nomenclature for Air Pollution.

For at emissionerne fra de nationale opgørelser kan anvendes til modellering af fx luftkvalitet, er der tilføjet en geografisk komponent. Hertil er udviklet den GIS- og databasebaserede model SPREAD (Plejdrup & Gyldenkerne, 2018). I modellen behandles emissionerne på det mest disaggregerede niveau, som er muligt på basis af de disponible geografiske data. En række kilder behandles som punktkilder, hvor den eksakte geografiske lokalitet er kendt. Punktkilder omfatter hovedsageligt el- og varmeproducenter samt større industrivirksomheder. Ud over punktkilderne er der en lang række kilder, der ikke kan lokaliseres enkeltvis, men som behandles gruppevis ud fra kildernes fælles karakteristika. Disse kilder kaldes arealkilder, og omfatter bl.a. energiforbrug i husholdninger, industrielle processer, anvendelse af opløsningsmidler og andre produkter, vejtransport, og andre mobile kilder, herunder ikke-vejgående maskiner i industrien. For hver enkelt kilde eller gruppe af kilder er der udviklet en nøgle til fordeling af de nationale emissioner ud fra de disponible geografiske data, fx arealanvendelse, befolkningstæthed, infrastruktur og trafikdata.

Den følgende opdeling af emissionskilderne fra SPREAD-modellen er p.t. implementeret i DEHM-modellen, se Tabel 2.1. Da der ofte er særlig fokus på SNAP2, 7 og 8 er disse med underinddeling.

Tabel 2.1. SNAP-koder for de forskellige kilder/emissionssektorer.

SNAP kode	Emissionskilder
SNAP01	Kraftvarme- og fjernvarmeværker, herunder affaldsforbrændingsanlæg
SNAP0201	Ikke-industriel forbrænding, handel og service
SNAP0202	Ikke-industriel forbrænding, husholdninger
SNAP0203	Ikke-industriel forbrænding, i landbrug, skovbrug og fiskeri
SNAP03	Fremstillingsvirksomhed og bygge- og anlægsvirksomhed
SNAP04	Industrielle processer
SNAP05	Udledninger i forbindelse med udvinding, behandling, lagring og transport af olie og gas
SNAP06	Anvendelse af produkter
SNAP0701	Vej transport -personbiler
SNAP0702	Vej transport -varebiler
SNAP0703	Vej transport -lastbiler
SNAP0704	Vej transport -knallert og motorcykler under 50 cm ³
SNAP0705	Vej transport -motorcykler over 50 cm ³
SNAP0706	Vej transport -fordampning af NMVOC fra benzinbiler
SNAP0707	Vej transport -dæk- og bremseslid
SNAP0708	Vej transport -vejslid
SNAP0801	Militær
SNAP0802	Jernbaner
SNAP080402	National søfart
SNAP080403	Nationalt fiskeri
SNAP080501	National LTO (start og landing, < 1000 m)
SNAP080502	International LTO (start og landing, < 1000 m)
SNAP080503	National flytrafik (> 1000 m)
SNAP0806	Maskiner og redskaber i landbrug
SNAP0807	Maskiner og redskaber i skovbrug
SNAP0808	Maskiner og redskaber i industri – inklusiv ikke-vejgående maskiner
SNAP0809	Maskiner og redskaber i have/hushold
SNAP0811	Maskiner og redskaber i handel og service
SNAP09	Affaldsbehandling, eksklusiv affaldsforbrænding
SNAP3B	Landbrug, husdyrgødning
SNAP3D	Landbrug, landbrugsjorde
SNAP3F	Landbrug, øvrigt

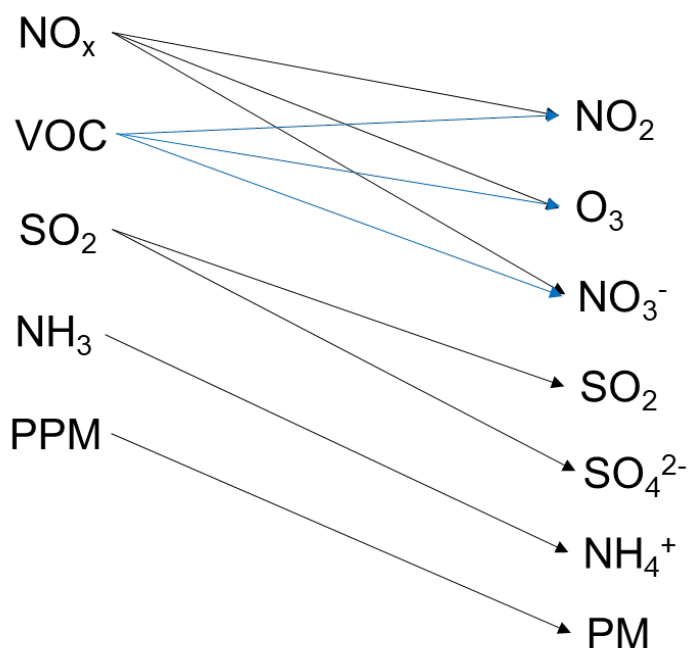
National søfart er SNAP-kategori 080402.

Luftforurening

De kemiske komponenter, som giver anledning til helbredseffekter, som er medtaget i EVA-systemet, er: Primært emitterede partikler (PPM_{2,5}), som består af mineralsk støv, primært emitterede organiske kulstofpartikler (BC og OC), sekundært dannede uorganiske partikler (SIA), som består af SO₄²⁻ (sulfatpartikler), NO₃⁻ (nitratpartikler) og NH₄⁺ (ammoniumpartikler), samt sekundære organiske partikler (SOA) og havsalt (SS). Endvidere indgår gasserne kvælstofdioxid (NO₂), svovldioxid (SO₂) og ozon (O₃).

DEHM-modellen beregner koncentrationen af 9 partikkelkomponenter og 58 gasser, herunder NO_x, NO₂, O₃, CO, SO₂, ammoniak (NH₃), og en række flygtige organiske forbindelser (Volatile Organic Compounds, VOC'er). Den totale PM_{2,5} i DEHM-modellen består af summen af følgende stoffer: PPM_{2,5}, BC (sod i "frisk" og "ældet" form) samt OC fra forbrændingsprocesser, og SIA. Modellen inkluderer også SOA og SS bidrag til partikkelmassen.

En række direkte emitterede stoffer bliver kemisk omdannet til andre stoffer i atmosfæren. Nogle af disse forhold er simplificeret beskrevet i Figur 2.2.



Figur 2.2. Forenklet oversigt over primære antropogene (menneskeskabte) emissioner (venstre side) og stoffer som koncentrationer, der giver helbredseffekter (højre side). NO₃⁻, SO₄²⁻ og NH₄⁺ er partikler og bidrager i forskellige kombinationer med hinanden til de samlede PM-koncentrationer (se tekst ovenover). PPM og PM (partikler) er ikke et enkelt stof men består af mange forskellige kemiske stoffer.

DEHM beskriver de kemiske processer i atmosfæren, som sker under transport. DEHM-modellen beskriver endvidere tørdeposition (fx afsætning til vegetation) og våddeposition (afsætning ved nedbør).

Delta-koncentrationer

Atmosfærekemiske processer er ikke-lineære, hvilket betyder, at en ændring af emissionen af et stof kan medføre endnu større ændringer i koncentrationen af andre stoffer i atmosfæren. For at vurdere den marginale ændring i den årlige middelkoncentration, som skyldes udledningen fra en specifik kilde-type, foretages beregningerne med DEHM to gange: Med og uden emissionerne fra kilden. Denne marginale ændring kaldes delta-koncentrationen, og det er den, som anvendes til at beregne befolkningseksponeringen relateret til den specifikke kilde, og de tilhørende helbredseffekter og eksterne omkostninger.

Befolkningseksponeringen er beregnet som befolkningens kontakt med den beregnede koncentration i centerpunktet af DEHM's gitterceller af 5,6 km x 5,6 km og befolkningen bosat inden for samme gitterceller.

Befolkningsdata

Danmark er i den unikke position, at vi har et centralt register med information vedrørende adresse, køn og alder for alle personer i landet (det Centrale Persondata Register, CPR). I forbindelse med nærværende projekt er der anvendt et tidligere erhvervet CPR-datasæt fra Sundhedsstyrelsen for hele Danmark fra 24. april 2017, som indeholder oplysninger om fødselsdag, køn og adresse for samtlige personer i Danmark. CPR-datasættet er koordinatsat ved

at matche datasættet med det nationale adresseregister. Befolkningsdata og kobling til adresseregister er nærmere beskrevet i Jensen et al. (2018).

Helbredseffekter

De helbredseffekter, som p.t. er beskrevet i EVA-systemet, er følgende:

- Bronkitis hos voksne
- Astma og bronkitis hos børn
- Sygedage (inkluderer også mindre restriktioner i aktivitet som fx hovedpine som påvirker arbejdsevnen og velværet)
- Hospitalsindlæggelser for åndedrætsbesvær og hjertekarsygdomme
- Lungekræft
- Akutte dødsfald (som følge af korttidseksponering)
- Tabte leveår (YOLL) (kroniske dødsfald som følge af langtidseksponering)
- Total antal dødsfald (=kroniske tabte leveår/10,6 + akutte dødsfald)

Dødsfald som følge af eksponering med forhøjede koncentrationer over kortere tid betegnes som akutte dødsfald, mens dødsfald som følge af eksponering over lang tid betegnes som kroniske dødsfald.

Antallet af for tidlige dødsfald relateret til NO₂- og partikelforurening beregnes ud fra YOLL (Years of Life Lost) divideret med en faktor for det typiske antal af tabte leveår i gennemsnit. I de nuværende EVA-beregninger er denne faktor 10,6 år, og den er baseret på beregninger ud fra en dansk levetidstabel (Andersen, 2017) med en tilsvarende metode som er anvendt i Clean Air for Europe projektet (Watkiss et al., 2005). Et for tidligt dødsfald svarer således til 10,6 tabte leveår i gennemsnit.

Eksponerings-responsfunktioner og enhedspriser

Delta-koncentrationerne beregnet med DEHM kobles til befolkningsdata for hver gittercelle for at beregne befolkningseksponeringen i eksponerings-responsberegningen.

Eksponerings-responsfunktioner er typisk tilgængelige på formen: $R = \alpha \cdot \Delta c \cdot P$, hvor R er responset (fx lungekræft eller akutte dødsfald) målt i en passende enhed (fx tilfælde af lungekræft eller antal dødsfald). Δc er delta-koncentrationen, det vil sige den marginale koncentrationsændring, som skyldes emissionerne fra den specifikke kilde, P er den berørte befolkningsdel og α er en empirisk bestemt konstant eller funktion for den specifikke funktion, typisk tilvejebragt fra publicerede studier af større befolkningsgrupper (kohorter).

Der er bred enighed om, at eksponerings-responsfunktionerne og de tilhørende enhedspriser er lande-specifikke, bl.a. fordi helbredsudfald hænger sammen med en række forskellige forhold, hvoraf levevis er en vigtig parameter. Desuden er befolkningernes almene helbredstilstand og landenes økonomier forskellige. De funktioner, der på nuværende tidspunkt er inkluderet i EVA (Tabel 2.2), er derfor så vidt muligt tilpasset til danske betingelser. Som det kan ses i Tabel 2.2, er nogle af helbredseffekterne kun relevante for specifikke aldersgrupper.

For referencer vedrørende eksponerings-responsfunktionerne og værdisætning henvises til Andersen et al. (2019); "Miljøøkonomiske beregningspriser for emissioner 3.0". I forhold til tidligere versioner af EVA-systemet er der nu inkluderet helbredseffekter af NO₂ ud fra anbefalinger fra WHO (WHO, 2013;2014). Af betydning for resultaterne er endvidere, at WHO særskilt har identificeret eksponerings-responsfunktioner for akut mortalitet for PM_{2,5} og NO₂ mod tidligere kun for SO₂ og ozon. De tabte leveår ved kronisk mortalitet for PM_{2,5} (som følge af langtidseksponering) er herefter opgjort for akut mortalitet på en måde, så der forsøges at undgå dobbelttælling af effekter. Endvidere er effekter på voksne astmatikere udgået, idet disse ikke er medtaget af WHO. Ved værdisætningen er anvendt en opdateret værdi for statistisk liv på 31,6 mio. kr., som er opgjort af De Økonomiske Råds Sekretariat (DØRS, 2016) og anbefalet af Finansministeriet (Finansministeriet, 2017). Denne værdisætning er omkring dobbelt så høj som den tidligere anvendte i EVA-systemet (Andersen et al., 2019).

Tabel 2.2. Hebredseffekter i EVA5.2. De anførte eksponerings-responsfunktioner refererer til årsmiddelværdien medmindre andet er angivet. Tabel gengivet fra Andersen et al. (2019).

Helbredseffekt	Eksponerings-responsfunktion	Værdisætning DKK (2016-priser)
MORBIDITET (PM_{2,5})		
Bronkitis (voksne)	7,02E-5 tilfælde pr. µg m ⁻³	293.863 pr. tilfælde
Indlæggelser		
- åndedrætsbesvær	2,75E-5 tilfælde pr. µg m ⁻³	74.053 pr. tilfælde
- hjertekarsygdomme	1,93E-5 tilfælde pr. µg m ⁻³	119.194 pr. tilfælde
Lungekræft, morbiditet	1,62E-6 tilfælde pr. µg m ⁻³ (> 30 år)	162.502 pr. tilfælde
Astma (9,4%; < 19 år) og bronkitis (<18 år) hos børn		
- astmasymptomer	4,05E-4 pr. µg m ⁻³	9.873 pr. år
- bronkitis (hoste)	1,37E-3 pr. µg m ⁻³	1.206 pr. år
Sygedage		
- arbejdsdage (20-65 år)	8,83E-3 dage pr. µg m ⁻³	2.031 pr. dag
- alle dage, netto	6,9E-2 dage pr. µg m ⁻³	1.105 pr. dag
MORBIDITET (NO₂)		
Indlæggelser		
- åndedrætsbesvær	2,6E-5 tilfælde pr. µg m ⁻³	74.053 pr. tilfælde
MORBIDITET (O₃>35ppb)		
Indlæggelser		
- åndedrætsbesvær	1,95E-5*SOMO35° dage/år (>65 år)	74.053 pr. tilfælde
- hjertekarsygdomme	6,33E-5*SOMO35° dage/år (>65 år)	119.194 pr. tilfælde
Sygedage		
- MRAD* ozon (O ₃ >35ppb)	3,29E-5*SOMO35° dage/år	584 pr. tilfælde
MORTALITET		
Akut mortalitet		
- PM _{2,5}	1,19E-5 pr. µg m ⁻³ minus SO ₂ /NO ₂	31.600.000
- SO ₂	6,97E-7 pr. µg m ⁻³	31.600.000
- NO ₂ *	2,61E-6 pr. µg m ⁻³	31.600.000
- PM _{2,5} spædbørn (3-12m)	6,15E-6 pr. µg m ⁻³	47.400.000
- ozon (O ₃ >35ppb)	2,81E-6*SOMO35° tilfælde pr. µg m ⁻³	31.600.000
Kronisk mortalitet		
- PM _{2,5}	0,932E-3 YOLL# pr. µg m ⁻³ (>30 år)	1.115.000 pr. YOLL#
- NO ₂ (>20µg/m ³)	0,625E-3 YOLL# pr. µg m ⁻³ (>30 år)	1.115.000 pr. YOLL#

° SOMO35 beregnes ud fra summen af de højeste ozonkoncentrationer og angiver summen af 8-timers daglige maksimum middelværdier over 35 ppb på et år.

* NO₂ beregnes ud fra daglige max-timeværdi.

YOLL er en forkortelse for "Years Of Life Lost" (tabte leveår).

+ Minor Restricted Activity Days (MRAD), dage med mindre restriktioner i aktivitet.

I lighed med anbefalingerne for WHO er det i EVA-beregningerne antaget, at alle partikler indeholdt i PM_{2,5} er lige skadelige.

En detaljeret gennemgang af danske såvel som internationale studier af helbredseffekter af luftforureningen i Danmark er sammenfattet i en dansk rapport fra 2014 (Ellermann et al., 2014).

Meteorologiske data

Ud over emissionsdata kræver beregninger med DEHM også adgang til meteorologiske data. Her er anvendt modellerede meteorologiske data fra den meteorologiske model WRF (Weather Research and Forecast model, Skamarock et al., 2005) for 2018, som køres rutinemæssigt på ENV5/AU, som en del af NOVANA-programmet.

Beregningsår

De danske emissionsdata repræsenterer 2018, og meteorologiske data og regionale baggrundsdata repræsenterer 2018, og derfor afspejler de beregnede koncentrationer og tilhørende helbredseffekter og eksterne omkostninger luftforureningen i 2018. Vær dog opmærksom på at grundlaget for den økonomiske værdisætning af de enkelte helbredseffekter er 2016 niveau.

3 NO_x- og PM_{2,5}-emissioner for national søfart i Danmark i 2018

I det følgende gøres der rede for emissionsopgørelsen for national søfart, og de aktivitetsdata, emissionsfaktorer og beregningsmetoder, som ligger til grund samt den geografiske fordeling af emissionerne.

3.1 Emissionsopgørelsen for national søfart

Emissionsopgørelsen for national søfart er opdelt i større færgeruter, mindre færger (ø- og genvejsfærger), øvrig national søfart og godstransport mellem Danmark og Grønland/Færøerne. Emissionerne for national søfart er placeret i SNAP (Selected Nomenclature for Air Pollution) kategorien 080402 i det nationale emissionsopgørelsessystem. Denne SNAP kategori indeholder ikke fiskesfartøjer eller fritidsfartøjer, der grupperes i hhv. SNAP 080403 og SNAP-080300, og som ikke er medtaget i de følgende beregninger.

For færger beregnes emissionerne som produktet af antallet af dobbeltture, sejltid pr. dobbelttur, motorstørrelsen, motorlastfaktoren og emissionsfaktoren. For øvrig national søtransport beregnes emissionerne som produktet af det estimerede brændstofsalg (Energistyrelsens statistiske salg for national søfart (2019) minus det beregnede forbrug for færger) og gennemsnitlige brændstofrelaterede emissionsfaktorer. For godstransport mellem Danmark og Grønland/Færøerne beregnes emissionerne som produktet af brændstofsalget og gennemsnitlige brændstofrelaterede emissionsfaktorer.

3.2 Aktivitetsdata for færger

Som input til emissionsberegningerne er følgende data indhentet for de enkelte færgeruter: Antallet af dobbeltture pr. år, sejltid pr. enkelttur, færge navn, motorstørrelse (kW), motortype, brændstoftype, gennemsnitlig motorbelastning, hjælpemotorstørrelse og færgens andel af ture på ruten.

Antallet af dobbeltture pr. år for de enkelte færgeruter hentes fra Danmarks Statistik (2019).

Tabel 3.1 viser de større færgeruter i Danmark i 2018. På Figur 3.1 er ruterne vist på et kort.

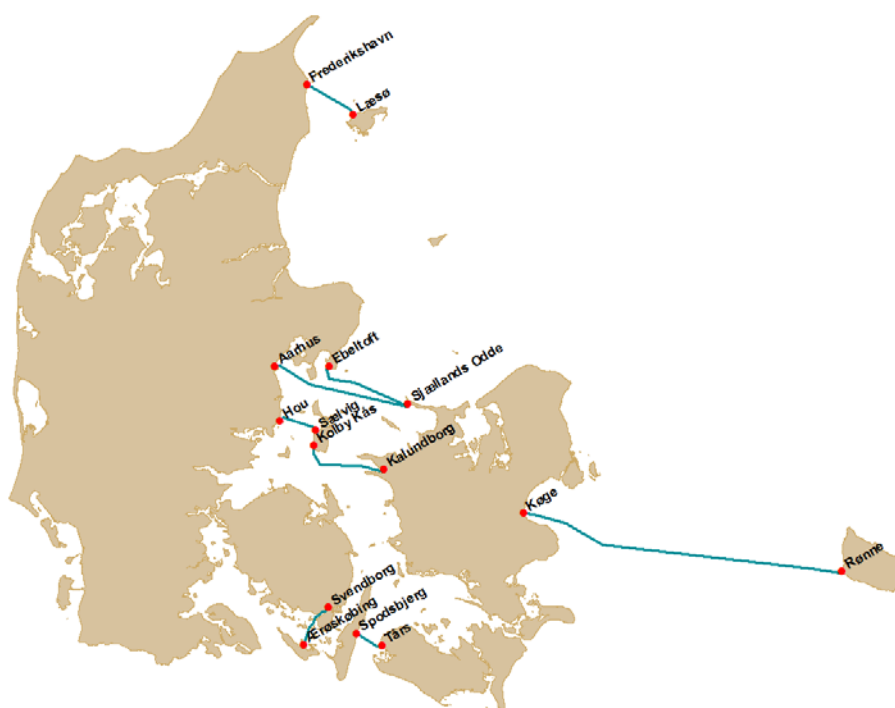
Tabel 3.1. Større færgeruter i Danmark i 2018 og antallet af dobbeltture.

Færgerute	Antal dobbeltture
Frederikshavn-Læsø	1.572
Hirtshals-Torshavn	61
Hov-Samsø	2.429
Kalundborg-Samsø	996
Køge-Rønne	365
Sjællands Odde-Ebeltoft	97
Sjællands Odde-Århus	3.662
Svendborg-Ærøskøbing	3.912
Tårs-Spødsbjerg	6.176

For de enkelte færgeruter er rute- og færgespecifikke data for Molslinjen (Sjællands Odde-Ebeltoft, Sjællands Odde-Århus, Kalundborg-Århus, Køge-Rønne) oplyst af Nielsen (2019). Data fra Færgen A/S (Køge-Rønne, Tårn-Spodsbjerg, Kalundborg-Samsø) kommer fra Jørgensen (2017). Data er leveret af Kruse (2015) for Samsø Rederi (Hou-Sælvig), Mortensen (2015) for Færgeselskabet Læsø (Frederikshavn-Læsø) og Eriksen (2017) for Ærøfærgerne (Svendborg-Ærøskøbing). For færgeren på ruten Hirtshals-Torshavn er data oplyst af Dávastovu (2010).

I det følgende anvendes forkortelser for de forskellige brændstoftyper: MDO/MGO (Marine Diesel Oil/Marine Gas Oil), HFO (Heavy Fuel Oil) og LNG (Liquified Natural Gas).

Næsten alle færger på de større færgeruter benyttede MDO/MGO diesel i 2018.



Figur 3.1. Indenrigs regionale færgeforbindelser i Danmark i 2018. Mindre færgeruter er ikke vist.

Tabel 3.2 viser de mindre færgeruter (ø- og genvejsfærgerne) i Danmark i 2018. For disse færgeruter er rute- og færgespecifikke data indsamlet af Rasmussen (2017) og Andersen (2019): Supplerende oplysninger om motortype, brændstoftype og gennemsnitlig motorbelastning kommer fra Kristensen (2017).

Alle færger på de mindre færgeruter brugte MDO/MGO i 2018 med undtagelse af færgeren Isabella, som bruger LNG på ruten Hov-Samsø, samt færgerne Hammerodde og Nye Norrøna på hhv. ruterne Køge-Rønne og Hirtshals-Torshavn, som bruger HFO.

Tabel 3.2. Mindre færgeruter i Danmark i 2018 og antallet af dobbeltture.

Færgerute	Antal dobbeltture
Assens-Baagø	1.620
Ballebro-Hardeshøj	10.281
Bandholm-Askø	2.947
Barsø Landing-Barsø	2.976
Branden-Fur	25.020
Bøjden-Fynshav	3.047
Esbjerg-Fanø	16.075
Feggesund overfart	13.737
Fejøl-Kragenæs	6.550
Femøl-Kragenæs	2.566
Fåborg-Avernakø-Lyø	2.203
Fåborg-Søby	806
Grenaa-Anholt	268
Gudhjem-Christiansø	646
Hals-Egense	27.883
Havnsø-Sejerø	1.693
Holbæk-Orø	3.906
Horsens-Endelave	1.023
Hov-Tunø	684
Hundested-Rørvig	5.288
Hvalpsund-Sundsøre	10.788
Kleppen-Venø	19.200
Næssund overfart	10.521
Rudkøbing-Strynø	2.970
Stignæs-Agersø	5.067
Stignæs-Omø	2.647
Stubbekøbing-Bogø	1.572
Svendborg-Skarø-Drejø	1.493
Søby-Fynshav	965
Thyborøn-Agger	5.991
Udbyhøj Nord - Udbyhøj Syd	15.185
Aarø-Aarøsund	6.828

I emissionsopgørelsen for 2018 indgår: Rute, antal dobbeltture, sejltid, færge-
navn, færgens andel af dobbeltture på ruten, motorbyggeår, brændstoftype,
motortype, hovedmotorstørrelse, hjælpemotorstørrelse, gennemsnitlig mo-
torbelastning samt specifik brændstofforbrug, NO_x- og PM_{2,5}- emissionsfak-
torer (g/kWh).

3.3 Aktivitetsdata for øvrig national søfart

Energiforbruget for den øvrige trafik mellem danske havne, øvrig national
søfart, findes pr. brændstoftype som forskellen mellem energiforbruget i
Energistyrelsens energistatistik og det bottom-up beregnede energiforbrug
for færgerne.

Brændstofmængden solgt i Danmark til godstransport mellem Grønland og
Færøerne er oplyst af Royal Arctic Line (Rasmussen, 2019). Denne brændstof-
mængde opgøres ikke som et forbrug i national søfart i Energistyrelsens sta-
tistik, men figurerer i stedet for som et forbrug under international søfart i
Energistyrelsens energistatistik. En tilpasning af energistatistikken til emissi-
onsopgørelserne sker ved at overføre brændstofmængden til national søfart
iht. FN Klimakonventionens retningslinjer for korrekt afrapportering for Kon-
geriget Danmark.

3.4 Emissionsfaktorer

Det specifikke brændstofforbrug og NO_x-emissionsfaktoren (g/kWh) afhænger af motortype og motorbyggeår. Basisfaktorer for det specifikke brændstofforbrug kommer fra Transportministeriets TEMA2015 model (2015), og NO_x-emissionsfaktorerne er oplyst af MAN Energy Solutions (2012). For LNG bruges NO_x- og PM-emissionsdata fra Bengtsson et al. (2011) og data for specifikt brændstofforbrug fra Kruse (2015).

Til brug for justering af basisfaktorerne ved lav motorbelastning og varierende motorbelastning under manøvrering bruges justeringsfunktioner oplyst af IMO (2015) baseret på data fra Starcrest (2013).

PM-emissionsfaktorerne (g/kWh) for diesel kommer fra IMO (2015), og afhænger generelt af brændstoffypen, brændstoffets svovlindhold og motorens specifikke brændstofforbrug. For MDO/MGO og HFO bruges et svovlindhold på 1000 ppm som input til beregningen af PM-emissionsfaktorerne. Svovlindholdet svarer til det gældende svovlkrav for skibsbrændstoffer inden for SECA (Sulphur Emissions Control Area), som Danmarks havområde er en del af. SECA er populært betegnet en miljøzone til søs (Miljøstyrelsen, 2021). 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).

Nærmere oplysninger om grunddata for specifikke brændstofforbrug og emissionsfaktorer kan ses i f.eks. Winther (2020) eller Jensen et al. (2021a).

For øvrig national søfart og godstransport til Grønland og Færøerne bruges gennemsnitlige brændstofrelaterede NO_x- og PM_{2,5}-emissionsfaktorer, som forklaret i afsnit 4.1.

3.5 Beregningsmetode

Brændstofforbruget og emissionerne for færgerne beregnes på følgende måde:

$$E(X) = \sum_i N_i \cdot T_i \cdot S_{i,j} \cdot P_i \cdot LF_j \cdot LAF_j \cdot EF_{k,l,y} \quad (1)$$

Hvor E = Brændstofforbrug/emission, N = antal dobbeltture, T = sejltime pr. dobbelttur (timer), S = færgens andel af dobbeltture på ruten, P = motorstyrke (kW), LF = gennemsnitlig motorbelastning, LAF = motorlastjusteringsfaktor, EF = brændstofforbrugs-/emissionsfaktor (g/kWh), i = færgerute, j = færge på ruten, k = brændstofftype, l = motortype, y = motorbyggeår.

For øvrig national søfart og godstransport mellem Danmark og Grønland/Færøerne beregnes emissionerne på følgende måde:

$$E(X) = \sum_i EC_{i,k} EF_{k,l} \quad (2)$$

Hvor E = energiforbrug/emissioner, EC = energiforbrug, EF = emissionsfaktor (g/kg brændstof), i = kategori (øvrig national søfart, godstransport til Grønland/Færøerne), k = brændstofftype, l = motortype.

Emissionsfaktoren der bruges i (2) er beregnet som et vægtet gennemsnit af de årsspecifikke emissionsfaktorer inden for skibets gennemsnitlige levetid, LT, der antages at være 30 år:

$$EF_{k,l} = \frac{\sum_{\text{år}=2018-LT}^{\text{år}=2018} EF_{k,l}}{LT_{k,l}} \quad (3)$$

3.6 Emissionsresultater

De samlede energiforbrug og NO_x- og PM_{2,5}-emissioner for national søfart i 2018 er vist i Tabel 3.3 opdelt pr. brændstoftype for større færger, mindre færger, øvrig national søfart og godstransport til Grønland/Færøerne.

Tabel 3.3. De samlede energiforbrug og NO_x- og PM_{2,5}-emissioner for national søfart i 2018 opdelt pr. brændstoftype for større færger, mindre færger, øvrig national søfart og godstransport til Grønland/Færøerne.

Brændstoftype		Energiforbrug		NO _x	PM _{2,5}	NO _x	PM _{2,5}
		PJ	Tons	Tons	Tons	% af samlet	
Større færgeruter	MDO/MGO	2,15	50388	2045	41,1		
	HFO	0,75	18400	1151	61,0		
	LNG	0,08	1723	13	0,7		
	I alt	2,99	70511	3210	102,8	26,9	37,1
Mindre færgeruter	MDO/MGO	0,32	7535	373	6,5	3,1	2,3
Øvrig national søfart	MDO/MGO	3,83	89708	6078	87,9		
	HFO	0,00	0	0	0,0		
	I alt	3,83	89708	6078	87,9	50,9	31,7
Grønland/Færøerne	MDO/MGO	0,43	10090	684	9,9		
	HFO	0,76	18597	1595	69,9		
	I alt	1,19	28687	2278	79,8	19,1	28,8
Samlet		8,33	196441	11939	277	100,0	100,0

De samlede NO_x- og PM_{2,5}-emissioner fra national søfart udgør hhv. 10% og 1,6% af de totale NO_x- og PM_{2,5}-emissioner for alle emissionskilder i den nationale emissionsopgørelse for 2018.

I de nationale emissionsopgørelser tages der i partikelemissionsberegningerne ikke specifikt hensyn til brug af scrubbertechnologi for de skibe, der benytter HFO. En scrubber bruges til at reducere svovl og partikler i skibenes udstødning.

I stedet bruges som nævnt i afsnit 2.3 partikelemissionsfaktorer for tung olie med en svovlprocent, der overholder lovkravet om maksimalt 1.000 ppm svovlindhold i de brændstoffer, som skibene bruger indenfor SECA.

Partikelemissionsfaktoren for skibe, der bruger HFO med 1.000 ppm svovlindhold, og skibe, der bruger HFO med et højere svovlindhold + scrubber, er i samme størrelsesorden og er 3-4 gange højere end partikelemissionsfaktoren for skibe, der benytter MDO/MGO.

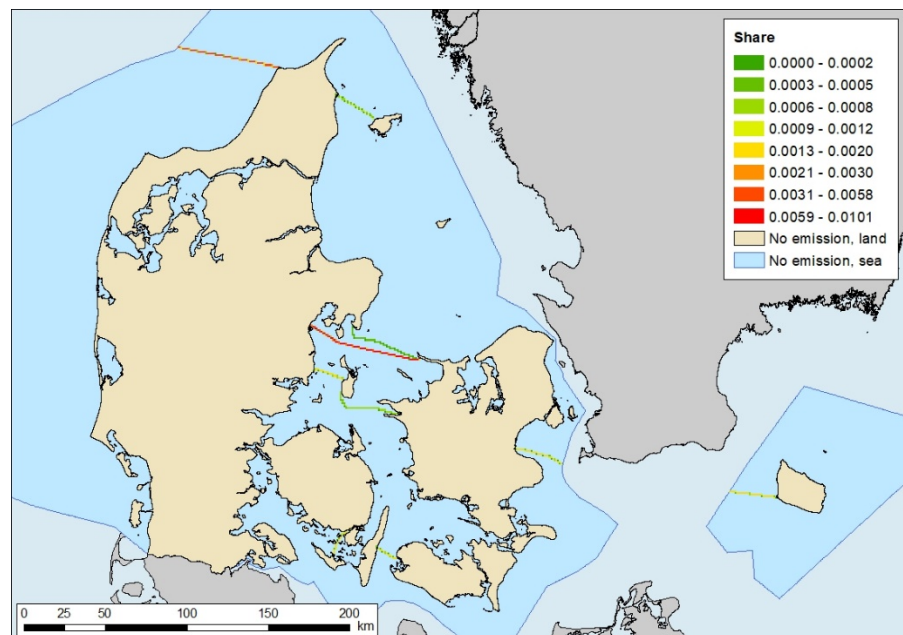
3.7 Rumlig fordeling af emissionerne

National søfart i den nationale emissionsopgørelse

Emissionerne for national søtransport fordeles inden for det danske havområde ved brug af fordelingsnøgler for energiforbruget beregnet ud fra energiforbruget for de enkelte færgeruter og energiforbruget for den øvrige søfart (Plejdrup et al., 2019).

For færger fordeles energiforbruget for de enkelte ruter ud på 1 km x 1 km celler, svarende til færgerutens længdeandel inden for hver af de 1 km x 1 km celler færgeruten gennemskærer.

NO_x- og PM_{2,5}-emissionerne fra færgeruten i den enkelte celle i havområdet beregnes herefter ved at gange den totale emission for færger med forholdet mellem energiforbruget for færgeruten i den enkelte celle og det totale energiforbrug for færger. Fordelingen af energiforbrug og emissioner er vist på Figur 3.2 for de enkelte færgeruter i 2018.



Figur 3.2. Fordeling af energiforbrug og emissioner for færger i 2018.

For øvrig national søfart fordeles energiforbruget ud i de enkelte 1 km x 1 km celler inden for det samlede danske havområde, idet nærmere trafikoplysninger ikke kendes til brug for en mere præcis fordeling inden for de enkelte celler i havområdet.

NO_x- og PM_{2,5}-emissionerne beregnes herefter for den enkelte celle i havområdet, ved at gange den totale emission for national søfart med forholdet mellem energiforbruget i cellen og det totale energiforbrug for national søfart.

Bemærk at for søtransport til Grønland/Færøerne samt færgeruten til Bornholm tillægges alle emissioner den del af ruten, der ligger inden for det danske havområde.

4 Potentiale for emissionsreduktion

Reduktionspotentialet tager udgangspunkt i de emissionsmålinger, som Teknologisk Institut har udført på to fartøjer af den demonstrerede reduktionsteknologi. Resultaterne herfra er generaliseret til et potentiale for reduktion af emissioner fra national søtransport. Målingerne og reduktionspotentialet er beskrevet i dette kapitel.

4.1 Målinger af Teknologisk Institut

Teknologisk Institut har udført partikelemissionsmålinger på færgen M/F Isefjord, der sejler på Hundested-Rørvig færgeruten (Teknologisk Institut, 2020). Partikelemissionsmålingerne er udført før og efter retrofit af partikelfilter og ved anvendelse af MDO/MGO diesel med et svovlindhold på 50 ppm. Måleresultaterne har vist en reduktion af partikelemissionerne på 99% med partikelfilteret eftermonteret set i forhold til emissionerne fra motoren uden filter påmonteret. Systemet er endvidere udstyret med en bypass ventil, således at det er muligt at føre udstødningen uden om filteret fx i forbindelse med vedligeholdelse af filteret. Målingerne har vist, at der var lækage gennem bypass ventilen også under normal drift, hvilket betyder, at reduktionerne i partikelemissionerne er under 90%. Målt lige efter filtret var reduktionen dog fortsat omkring 99%, og det er dette vi har lagt til grund for reduktionsscenarioet, da dette burde være muligt at opnå med en velfungerende bypass ventil.

Teknologisk institut vurderer, at partikelfiltre kan fremstilles af særlige katalysatormaterialer, som er tolerante over for en svovlprocent på op til 1.000 ppm, der er det maksimalt tilladelige svovlindhold for MDO/MGO diesel. Ved brug af de rigtige materialer kan partikelfilterteknologien med andre ord tages i brug på alle skibe, der benytter MDO/MGO som brændstof, og denne antagelse er derfor gjort i de efterfølgende emissionsreduktionsberegninger.

For tung olie (HFO) med højt svovlindhold vurderes det ikke at være realistisk at anvende partikelfiltre pga. problemer med aske og sod, der skabes ved forbrændingen og fører til tilstopning af partikelfilteret (Teknologisk Institut, 2020). Partikelemissionskonsekvenser ved brug af filtre og tung olie medtages derfor ikke i de efterfølgende emissionsreduktionsberegninger.

Foreløbige emissionsmålinger før og efter eftermontering af SCR (Selective Catalyst Reduction) til nedbringelse af NO_x-emissionerne er udført på fartøjet World Mistral. Der forventes en NO_x-reduktion på omkring 80%. Det er samtidigt Teknologisk Instituts vurdering, at SCR-teknologien kan eftermonteres på alle fartøjer uanset typen af brændstof (Teknologisk Institut, 2020). I forhold til NO_x er målsætningen om 80% reduktion implementeret direkte i IMO (International Maritime Organization) NO_x Tier reguleringen af emissioner fra skibe fra Tier I til III. Potentialet for NO_x-reduktion med SCR kan være højere end 80% i mange tilfælde, men i praksis vil motorudviklerne nok optimere løsningerne mod 80% reduktion for at opnå overholdelse af IMO-reguleringen. Til brug for de efterfølgende emissionsreduktionsberegninger for NO_x er der derfor antaget, at NO_x-emissionerne reduceres med 80% for al brug af MDO/MGO og HFO i national søfart.

De pågældende reduktioner er under forudsætning af fungerende teknologi og god vedligeholdelse, og reduktionerne vil i praksis være lavere, hvis dette ikke er tilfældet.

4.2 Emissioner i reduktionsscenario

Tabel 4.1 viser de samlede energiforbrug og emissionsresultater for NO_x og PM_{2,5} i reduktionsscenarioet - eftermontering af partikelfiltre på skibe, der bruger MDO/MGO og eftermontering af SCR på skibe, der bruger MDO/MGO eller HFO - for national søfart i 2018.

Resultaterne er opdelt pr. brændstoftype for større færger, mindre færger, øvrig national søfart og godstransport til Grønland/Færøerne.

Tabel 4.1. Emissionsreduktionsscenario. De samlede energiforbrug og NO_x- og PM_{2,5}-emissioner for national søfart i 2018 opdelt pr. brændstoftype for større færger, mindre færger, øvrig national søfart og godstransport til Grønland/Færøerne (se også tabel 4.3).

	Brændstoftype	Energiforbrug		NO _x	PM _{2,5}
		PJ	Tons	Tons	Tons
Større færgeruter	MDO/MGO	2,15	50388	409	0,4
	HFO	0,75	18400	230	61,0
	LNG	0,08	1723	13	0,7
	I alt	2,99	70511	653	62,1
Mindre færgeruter	MDO/MGO	0,32	7535	75	0,1
Øvrig national søfart	MDO/MGO	3,83	89708	1216	0,9
	HFO	0,00	0	0	0,0
	I alt	3,83	89708	1216	0,9
Grønland/Færøerne	MDO/MGO	0,43	10090	137	0,1
	HFO	0,76	18597	319	69,9
	I alt	1,19	28687	455,7	70,0
Samlet		8,33	196441	2399	133

For NO_x og PM_{2,5} beregnes emissionsreduktioner på hhv. 80% og 52% for national søfart, hvis der sker en eftermontering af partikelfiltre på skibe, der bruger MDO/MGO og eftermontering af SCR på skibe, der bruger MDO/MGO eller HFO inden for national søfart som forudsat i scenariet. De procentvise emissionsreduktioner svarer til emissionsbesparelser på 9.541 tons NO_x og 144 tons PM_{2,5}.

Større samlede reduktioner af PM_{2,5}-emissioner forudsætter substitution af HFO med MDO/MGO for at partikelfiltre kan anvendes jf. beskrivelsen af teknologi og brændstofkrav givet i kapitel 3.

5 Koncentrationer i reduktionsscenariet

I dette kapitel beskrives, hvordan scenariet for emissionsreduktioner er implementeret i luftkvalitetsberegninger med DEHM for at kunne beregne koncentrationsforskellen mellem basissituationen og reduktionsscenariet. Endvidere er den geografiske fordeling vist for koncentrationsforskellen for udvalgte stoffer. Koncentrationsforskellen benyttes i de efterfølgende helbreds-beregninger med EVA-systemet.

5.1 Beregning af koncentrationsbidrag med DEHM

Emissionerne for national søtransport udgør en mindre del af alle skibsrelaterede emissioner inden for det danske havområde, idet der er megen international søtransport, der sejler gennem danske havområder, hvor særligt Øresund benyttes.

Alle emissionsdata inden for det danske havområde er baseret på et projekt udført sammen med FMI (Finsk Meteorologisk Institut) kombineret med opdaterede emissionsfaktorer fra det såkaldte EPITOME projekt (Geels et al., 2021). Herigennem er der skabt et datasæt, som indeholder både nationale og internationale søtransportsemissioner geografisk fordelt på et gitternet, som har en grovere opløsning end emissionerne for den nationale søfart.

Det er ikke muligt at adskille, hvad der er nationale og internationale emissioner i de enkelte gitterceller, da denne information ikke findes i EPITOME datasættet. Ændringerne i den rumlige emissionsopgørelse, som konsekvens af emissionsændringerne for national søfart i reduktionsscenariet, er derfor håndteret i projektet på følgende måde:

Først er der kørt en basiskørsel med DEHM, hvor de nationale emissioner fra søtransport er tilføjet (SPREAD emissioner for sektor 080402). Derefter er der kørt en scenariekørsel med DEHM, hvor de nationale emissioner for søtransport er tilføjet, men reduceret med en faktor 0,80 (NO_x) hhv. 0,52 ($\text{PM}_{2,5}$) i hver gittercelle, som er reduktionspotentiallet.

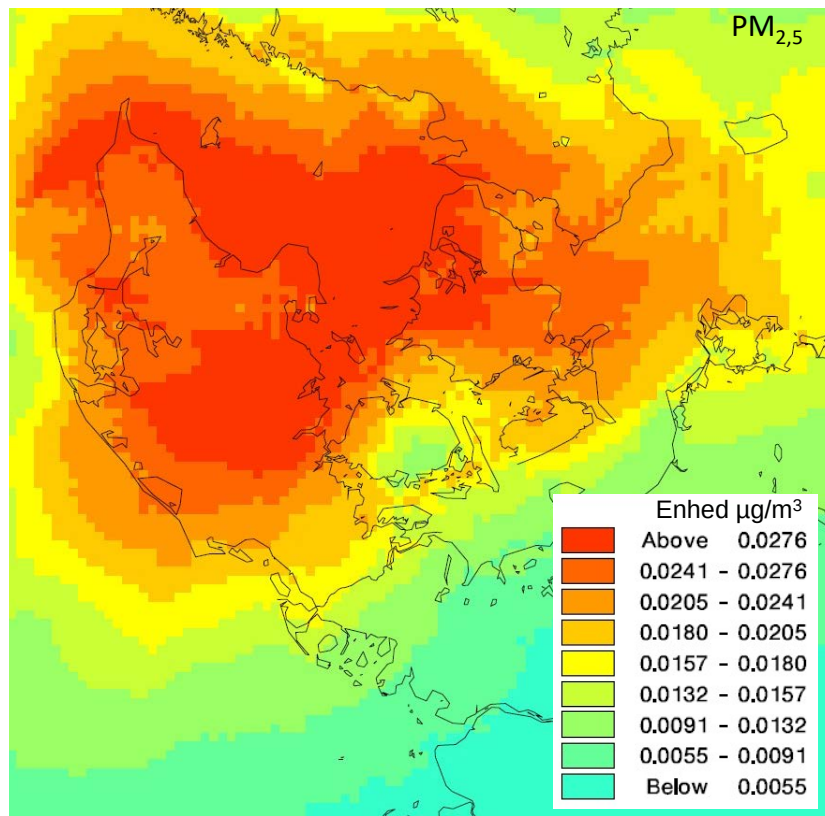
Forskellen mellem basis- og scenarie-kørslerne er den koncentrationsforskel, som emissionsreduktionerne giver anledning til i hver gittercelle.

Størrelsen og den geografiske fordeling af emissionerne følger derfor SPREAD-fordelingen.

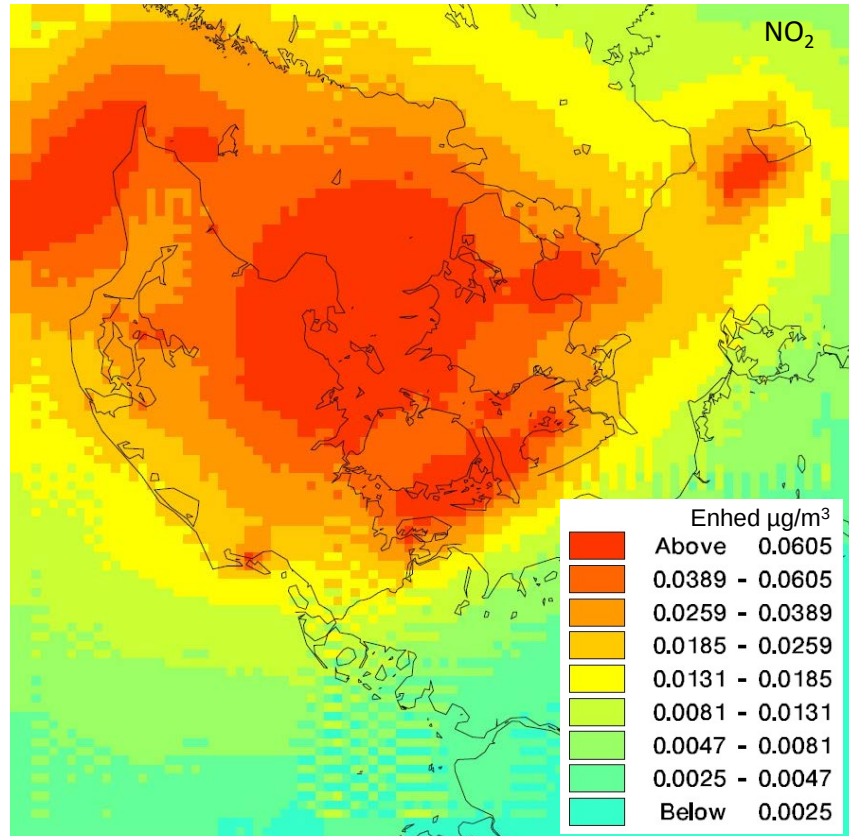
5.2 Geografisk fordeling af koncentrationsforskelle

I det følgende er vist koncentrationsforskellen mellem basis og scenariekørslerne for udvalgte stoffer, hvilket illustrerer den koncentrationsforskel, som scenariet for emissionsreduktion giver anledning til i hver gittercelle. I de efterfølgende helbreds-beregninger udgør $\text{PM}_{2,5}$, NO_2 og O_3 de største bidrag, og koncentrationsforskellene er derfor vist for disse stoffer.

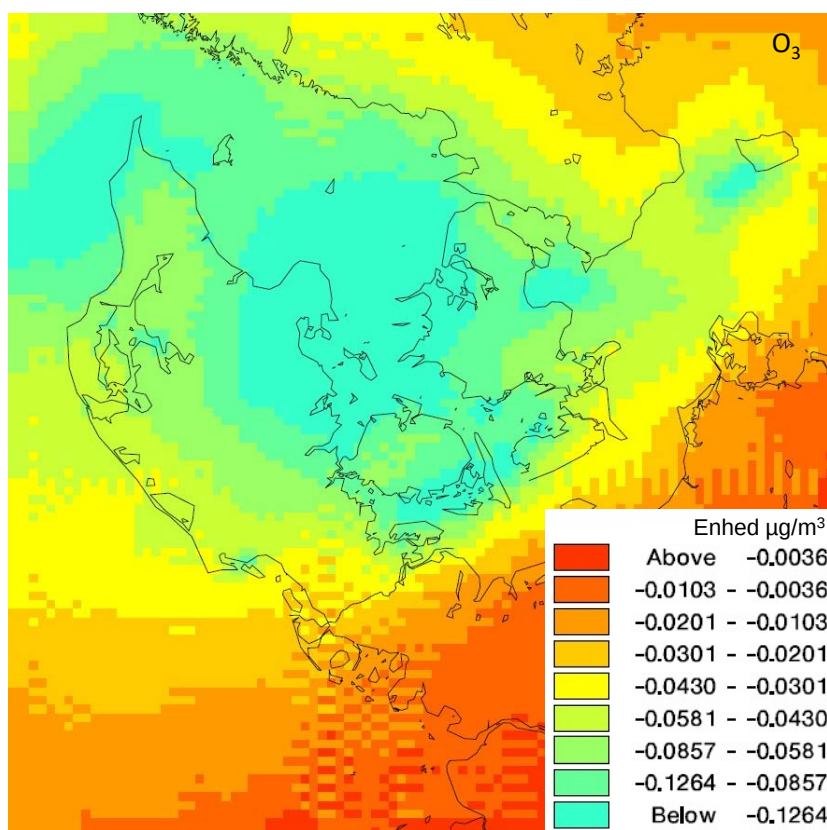
I Figur 5.1 er vist koncentrationsforskellene for $\text{PM}_{2,5}$, i Figur 5.2 for NO_2 og i Figur 5.3 for O_3 .



Figur 5.1. Koncentrationsforskel beregnet med DEHM for PM_{2,5} som følge af scenariet for emissionsreduktion i national søfart i 2018.



Figur 5.2. Koncentrationsforskel beregnet med DEHM for NO₂ som følge af scenariet for emissionsreduktion i national søfart i 2018.



Figur 5.3. Koncentrationsforskel beregnet med DEHM for O_3 som følge af scenariet for emissionsreduktion i national søfart i 2018.

Det ses, at koncentrationsforskellene (beregnet som basis - scenarie) for NO_2 og $PM_{2,5}$ har positivt fortegn, hvilket betyder, at koncentrationerne som forventet falder som følge af scenariet for emissionsreduktion.

Det ses endvidere, at koncentrationsforskellene er større for NO_2 i forhold til $PM_{2,5}$, og der er en større gradient i data for NO_2 med større forskel mellem lave og høje koncentrationsforskelle. For NO_2 kan man også se bidraget fra fx færgeruten ved Bornholm, men ellers har den generelle geografiske fordeling for NO_2 og $PM_{2,5}$ store ligheder, da emissionen for de to stoffer har samme geografiske fordeling, og reduktionen er foretaget i samtlige gitterceller.

Den geografiske fordeling af O_3 har et omvendt mønster af NO_2 . Det skyldes fotokemiske reaktioner mellem O_3 , NO og NO_2 , hvor NO_x -emission fra skibene reducerer O_3 , og koncentrationsforskellen for O_3 bliver således negativ, svarende til at O_3 stiger som følge af reduktion af NO_x -emissionen i scenariet for emissionsreduktion. Dette er også forventeligt.

6 Helbredseffekter og eksterne omkostninger

I dette kapitel beskrives reduktion i helbredseffekter og tilhørende eksterne omkostninger beregnet med EVA-systemet som følge af reduktionsscenariet for national søtransport.

6.1 Reduktion af helbredseffekter

Tabel 6.1 viser sparede helbredseffekter i form af dødelighed og sygelighed ved reduktionsscenariet for national søtransport. Helbredseffekterne er opdelt i "Hele Europa" (inkl. Danmark) og "Kun Danmark".

Det ses, at i Danmark vil reduktionsscenariet potentielt kunne spare 17 for tidlige dødsfald om året, mens det samlede antal i hele Europa inkl. Danmark er 98 for tidlige dødsfald.

Herudover vil der være en reduktion i sygelighed. Bemærk at hospitalsindlæggelser pga. hjertekarsygdomme og dage med delvist nedsat aktivitet stiger (negativt fortegn). Dette skyldes, at koncentrationerne af O_3 stiger som følge af lavere NO_x -emissioner.

Tabel 6.1. Reduktion af helbredseffekter som følge af reduktionsscenariet for national søtransport i 2018.

Helbredseffekter	Hele Europa	Kun Danmark
<i>Dødelighed</i>		
For tidlige dødsfald fra korttidseksposering ($PM_{2,5}$, SO_2 , NO_2 , O_3)	22	6
For tidlige dødsfald fra langtidseksposering ($PM_{2,5}$, NO_2)	76	11
Dødsfald blandt spædbørn ($PM_{2,5}$)	0	0
Totalt antal for tidlige dødsfald ($PM_{2,5}$, NO_2 , O_3 , SO_2)	98	17
<i>Sygelighed</i>		
Hospitalsindlæggelser for åndedrætsbesvær ($PM_{2,5}$, NO_2 , O_3)	74	25
Hospitalsindlæggelser for hjertekarsygdomme ($PM_{2,5}$, O_3)	13	-1
Astmasymptomer børn ($PM_{2,5}$)	8	1
Bronkitis voksne ($PM_{2,5}$)	72	11
Bronkitis børn ($PM_{2,5}$)	238	37
Dage med tabt arbejde ($PM_{2,5}$)	7037	1000
Dage med nedsat aktivitet (sygedage) ($PM_{2,5}$)	88800	13100
Dage med delvist nedsat aktivitet (sygedage) (O_3)	13	-6
Lungekræft ($PM_{2,5}$)	1	0

Til sammenligning var antallet af for tidlige dødsfald pga. emissioner fra alle danske kilder 1.220 i 2018, og samme år var danske kilder skyld i 3.030 for tidlige dødsfald i Europa inkl. Danmark (Ellermann et al., 2020).

De 17 for tidlige dødsfald i Danmark, som kan spares i reduktionsscenariet, udgør således omkring 1,4% af antallet af for tidlige dødsfald pga. emissioner fra alle danske kilder. De 98 for tidlige dødsfald i Europa inkl. Danmark udgør tilsvarende omkring 3,2% af Danmarks bidrag til Danmark og udland.

6.2 Reduktion af eksterne omkostninger

Tabel 6.2 viser reduktionen i eksterne omkostninger ved de sparede helbredseffekter som følge af reduktionsscenarioet for national søtransport underopdelt på stoffer, der indgår i EVA-systemet.

Partikler indgår med forskellige partikelkomponenter. De primært emitterede partikler er PPM_{2,5}, BC og OC. Det vi har kaldt øvrige partikler, er de sekundært dannede partikler SIA, (som omfatter SO₄²⁻, NO₃⁻ og NH₄⁺), samt SOA og SS. Total PM_{2,5} er summen af PPM_{2,5} og øvrige PM.

Endvidere indgår gasserne: NO₂, SO₂ og O₃.

Som det fremgår af Tabel 6.2, er de samlede sparede eksterne omkostninger af helbredseffekter fra luftforurening 332 mio. kr. om året i reduktionsscenarioet for national søtransport, mens det er 1,7 mia. kr. om året i hele Europa inkl. Danmark. 19% af gevinsten er i Danmark, mens 81% af gevinsten er i det øvrige Europa.

Langt den største andel kommer fra partikler og især øvrige partikler. Det gælder både for "Kun Danmark" og "Hele Europa" (inkl. Danmark) med hhv. 217 mio. kr. og 1,5 mia. kr. for alle partikler.

Det næststørste bidrag kommer fra NO₂ med 133 mio. kr. i Danmark og 203 mio. kr. i Europa (inkl. Danmark). Bidraget fra SO₂ er marginalt.

For Danmark bidrager reduktionsscenarioet til mere O₃ og dermed flere helbredseffekter som følge af O₃, da reduktion af NO_x-emissionen i Danmark fører til højere O₃. For Danmark optræder omkostningen derfor med negativt fortegn. Helbredsomkostningerne stiger med 17 mio. kr. i Danmark. Derimod spares der 37 mio. kr. i Europa (inkl. Danmark), da reduktion i NO_x-emission i Danmark fører til reduceret O₃ i Europa, da NO_x er en prækursor (forløber) til dannelse af O₃ på en stor geografisk skala.

Tabel 6.2. Reduktion af eksterne omkostninger ved sparede helbredseffekter som følge af reduktionsscenarioet for national søtransport i 2018.

Mio. DKK	Total	SO ₂	O ₃	NO ₂	PPM _{2,5}	Øvrige PM	Total PM _{2,5}
Hele Europa inkl. Danmark	1747	0,30	37	203	33	1474	1507
Kun Danmark	332	0,01	-17	133	12	205	217
Procent i Danmark	19%	5%	-47%	65%	35%	14%	14%

Til sammenligning er de samlede helbredsomkostninger pga. emissioner fra alle danske kilder 24 mia. kr. i 2018, og danske kilder var skyld i helbredsomkostninger på 58 mia. kr. i Europa inkl. Danmark (Ellermann et al., 2020). De 332 mio. kr., som kan spares i reduktionsscenarioet, udgør således omkring 1,4% af de samlede helbredsomkostninger pga. emissioner fra alle danske kilder. De 1,7 mia. kr. i Europa inkl. Danmark udgør tilsvarende omkring 3,0%.

6.3 Enhedspriser for national søfart

I Tabel 6.3 er vist enhedspriser for NO_x og PM_{2,5}. Enhedspriser beregnes som de samlede omkostninger, som stoffet giver anledning til, divideret med emissionen af stoffet. Enhedsprisen udtrykker således den helbredsomkost-

ning, der er knyttet til udledning af et kilo af stoffet. Enhedspriser kan fx anvendes til at give et overslag over de sparede helbredsomkostninger ved et reduktionstiltag, hvor emissionsreduktionen er kendt.

Emission af NO_x giver anledning til helbredseffekter for NO₂, O₃ og NO₃, hvor sidstnævnte er en del af SIA, og en del af, hvad vi betegner som "øvrige partikler" i beregningerne. PPM_{2,5} er de primært emitterede partikler.

Table 6.3. Enhedspriser for NO_x og PPM_{2,5} for national søfart.

Enhedspriser	Europa inkl. Danmark	Danmark
Luftforurening	Kr./kg	Kr./kg
NO _x (NO ₂ -enheder)	122	26
PPM _{2,5} (primære partikler)	230	81

Enhedspriser er også tidligere beregnet for alle hovedemissionssektorerne i Danmark for 2016 (Andersen et al., 2019). Der er ikke lavet beregninger, som er direkte sammenlignelige med de her præsenterede for national søfart. Sammenlignes med den gennemsnitlige enhedspris for alle emissionskilder for Europa inkl. Danmark er den 254 kr./kg for NO_x og 572 kr./kg for PPM_{2,5}, dvs. omtrent dobbelt så høje, som beregnet for national søtransport. Dette skyldes, at de landbaserede kilder er tættere på befolkningen, som derved eksponeres for relativt højere koncentrationer tæt på kilderne, mens der ikke bor mennesker tæt på skibsemissionerne (undtaget i havnene).

7 Diskussion af usikkerheder

Først diskuteres generelle usikkerheder i forbindelse med EVA-systemet. Dernæst diskuteres specifikke usikkerheder i nærværende projekt.

7.1 Hovedelementerne i EVA-systemet

EVA-systemet er baseret på "Impact-pathway" kæden, som dækker alle ledene fra udslip af kemiske stoffer fra specifikke kilder, over spredning og kemisk omdannelse i atmosfæren, eksponering af befolkningen, beregning af helbredseffekter, til den økonomiske værdisætning af disse helbredseffekter. De forskellige led i kæden er forbundet med større eller mindre usikkerheder.

En detaljeret gennemgang af de forskellige usikkerheder i de forskellige led i kæden er beskrevet i Jensen et al. (2021b).

Samlet usikkerhed

En tysk undersøgelse har forsøgt at beregne antal for tidlige dødsfald i Europa som følge af luftforurening efter grundlæggende samme principper som i EVA-systemet. Den tyske undersøgelse vurderer, at den samlede usikkerhed formentligt er omkring $\pm 50\%$ (Lelieveld et al., 2019). Det er DCE's faglige skøn, at den usikkerhed, som er angivet i det tyske studie, er i god overensstemmelse med den usikkerhed, man må regne med i denne type studier (Hertel et al., 2019). Dette gælder for basisberegningen.

Fremadrettet vil DCE fortsat løbende følge med i de videnskabelige landvinninger i relation til vurdering af helbredseffekterne af luftforureningen og implementere disse i estimering af helbredseffekterne, så snart de er velkonsoliderede, og det er praktisk muligt. DCE koordinerer og deltager i et stort antal forskningsprojekter omkring helbredseffekter fra luftforurening. Fremtidig opdatering af modelsystemet vil så vidt muligt fortsat ske på basis af og i tæt dialog med andre centrale forskningsinstitutioner på området. Opdateringerne vil ske med passende mellemrum, når der er sket væsentlige fremskridt i forskningen omkring helbredsrelaterede effekter af luftforureningen.

7.2 Usikkerheder i forbindelse med national søtransport

Emission og geografisk fordeling

Emissionsopgørelsen for national søfart er opdelt i større færgeruter, mindre færger (ø- og genvejsfærger), øvrig national søfart og godstransport mellem Danmark og Grønland/Færøerne.

Bemærk at national søfart ikke indeholder fiskefartøjer eller fritidsfartøjer, og som derfor ikke er medtaget i reduktionsscenariet. Emissionspotentialer er derfor lidt større, hvis fx større fiskefartøjer også inkluderes i reduktionsscenariet.

Emissionen for færger er godt bestemt og udlagt geografisk korrekt. For øvrig national søtransport er emissioner baseret på brændstofsalg, og emissionen er jævnt fordelt i det danske farvand, da der ikke er informationer om, hvor emissionen finder sted. For godstransport mellem Danmark og Grønland/Færøerne er emissionen udlagt i ruter, men al emission betragtes som at

finde sted i dansk farvand, hvilket vil overvurdere emissionen i dansk farvand. Som det fremgår, er der derfor en del usikkerhed om præcist, hvor dele af emissionen fra national søtransport finder sted.

Reduktionsscenariet er et maksimum

Reduktionspotentialer tager udgangspunkt i de emissionsmålinger, som Teknologisk Institut har udført på to fartøjer af den demonstrerede reduktionsteknologi. Resultaterne herfra er generaliseret til et potentiale for reduktion af emissioner fra national søtransport. Generaliseringen hviler på et beskedent grundlag, da kun to demonstrationsteknologier blev testet, og dette er sket under optimale og kontrollerede forhold.

Der er tale om et maksimumscenarie, da det ikke er muligt at vurdere om alle skibe under national søtransport teknisk og økonomisk kan få eftermonteret den demonstrerede teknologi. I praksis vil det ikke være muligt at eftermontere reduktionsteknologi på alle skibe under national søtransport.

De pågældende målte reduktioner er under forudsætning af fungerende teknologi og god vedligeholdelse, og reduktionerne vil være lavere, hvis dette ikke er tilfældet, hvilket også forplanter sig i national søtransports bidrag til luftkvaliteten og dens geografiske fordeling.

Luftkvalitetsberegninger

De koncentrationsforskelle, som reduktionsscenariet giver anledning til, er beregnet med DEHM, som har en geografisk opløsning på 5,6 km x 5,6 km. Det ville også være muligt at supplere med UBM, som har en opløsning på 1 km x 1 km, hvor den højere opløsning, alt andet lige, vil give lidt højere geografisk variation i luftkvaliteten, og dermed føre til lidt større helbredseffekter og tilhørende eksterne omkostninger. I det aktuelle tilfælde vurderes effekten heraf dog at være meget beskedent, da emissionerne fra national søtransport for en stor dels vedkommende finder sted relativt langt fra land, og dermed langt fra hvor befolkningen opholder sig. Når der er langt mellem emission og den eksponerede befolkning, har det mindre betydning, om der benyttes luftkvalitetsmodellering med meget høj eller lidt lavere opløsning, da det er afstanden, som har betydning for forthyndingen.

Referencer

Andersen, M.S. (2017): Co-benefits of climate mitigation: Counting statistical lives or life-years? *Ecological Indicators* 79, pp. 11-18.

Andersen, C., 2019: Data undersøgt for små færger, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi.

Andersen, M.S., Frohn, L.M., Brandt, J., 2019. Miljøøkonomiske beregningspriser for emissioner 3.0. Notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi Dato: 14. marts 2019.

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

Brandt, J., J. H. Christensen, L. M. Frohn, F. Palmgren, R. Berkowicz and Z. Zlatev (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, J. H. Christensen, M. S. Andersen, J. Bønløkke, T. Sigsgaard, C. Geels, A. Gross, A. B. Hansen, K. M. Hansen, G. B. Hedegaard, E. Kaas and L. M. Frohn (2011a): Assessment of Health-Cost Externalities of Air Pollution at the National Level using the EVA Model System. CEEH Scientific Report No 3, Centre for Energy, Environment and Health Report series, March 2011, p. 98.

Brandt, J., J. D. Silver, J. H. Christensen, M. S. Andersen, J. H. Bønløkke, T. Sigsgaard, C. Geels, A. Gross, A. B. Hansen, K. M. Hansen, G. B. Hedegaard, E. Kaas and L. M. Frohn (2011b): EVA- en metode til kvantificering af sundhedseffekter og eksterne omkostninger. Temanummer om helbredseffekter af vedvarende energi. Sundhedsstyrelsens Rådgivende Videnskabelige Udvalg for Miljø og Sundhed. *Formidlingsblad* 17. årgang, suppl. 1, okt. 2011, pp 3-10.

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.

Brandt, J., Silver, J. D., Christensen, J. H., Andersen, M. S., Bønløkke, J. H., Sigsgaard, T., Geels, C., Gross, A., Hansen, A. B., Hansen, K. M., Hedegaard, G. B., Kaas, E., and Frohn, L. M. (2013a): Contribution from the ten major emission sectors in Europe and Denmark to the health-cost externalities of air pollution using the EVA model system - an integrated modelling approach, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 7725-7746, <https://doi.org/10.5194/acp-13-7725-2013>.

Brandt, J., Silver, J. D., Christensen, J. H., Andersen, M. S., Bønløkke, J. H., Sigsgaard, T., Geels, C., Gross, A., Hansen, A. B., Hansen, K. M., Hedegaard, G. B., Kaas, E., and Frohn, L. M. (2013b): Assessment of past, present and future health-cost externalities of air pollution in Europe and the contribution from international ship traffic using the EVA model system, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 7747-7764, <https://doi.org/10.5194/acp-13-7747-2013>.

Brandt, J., Jensen, S.S., Andersen, M.S., Plejdrup, M.S., Nielsen, O.K. (2016a): Helbredseffekter og helbredsomkostninger fra emissionssektorer i Danmark. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 47 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 182. <http://dce2.au.dk/pub/SR182.pdf>

Brandt, J., Andersen, M. S., Bønløkke, J. H., Christensen, J. H., Ellermann, T., Hansen, K. M., Hertel, O., Im, U., Jensen, A., Jensen, S. S., Ketzel, M., Nielsen, O.-K., Plejdrup, M. S., Sigsgaard, T., Geels, C. (2016b): Helbredseffekter og eksterne omkostninger fra luftforurening i Danmark over 37 år (1979-2015). *Miljø og Sundhed*, 22. årgang, nr. 1, september 2016.

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

Dávastovu, J. 2010: Unpublished data material from Smyril Line.

DØRS (2016): Værdi af statistisk liv. Luftforurening. Danmark fossilfri 2050. Diskussionsoplæg. Udarbejdet af formandsskabet for De Økonomiske Råd til møde i Det Økonomiske Råd den 1.3.2016.

Ellermann, Thomas, Brandt, Jørgen, Hertel, Ole, Loft, Steffen, Jovanovic Andersen, Zorana, Raaschou-Nielsen, Ole, Bønløkke, Jakob & Sigsgaard, Torben (2014): Luftforureningens indvirkning på sundheden i Danmark. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 151 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 96. <http://dce2.au.dk/pub/SR96.pdf>

Ellermann, T., Brandt, J., Frohn, L.M., Geels, C., Christensen, J.H., Ketzel, M., Jensen, S.S., Nordstrøm, C., Nøjgaard, J.K., Nygaard, J., Monies, C., Nielsen, E, I. (2019): Luftkvalitet og helbredseffekter i Danmark, status 2018. Notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi Dato: 11-06-2019.

Ellermann, T., Nygaard, J., Nøjgaard, J.K., Nordstrøm, C., Brandt, J., Christensen, J., Ketzel, M., Massling, A., Bossi, R., Frohn, L.M., Geels, C. & Jensen, S.S. 2020. The Danish Air Quality Monitoring Programme. Annual Summary for 2018. Aarhus University, DCE - Danish Centre for Environment and Energy, 83 pp. Scientific Report from DCE - Danish Centre for Environment and Energy No. 218. <http://dce2.au.dk/pub/SR360.pdf>

Energistyrelsen, 2019: The Danish energy statistics, Available at: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/energistatistik_2018.pdf (18-12-2019).

Eriksen, J., 2017: Data tilsendt fra Ærøfærgerne A/S.

Finansministeriet (2017): Vejledning i samfunds økonomiske konsekvensvurderinger. August 2017.

Geels, C., Winther, M., Andersson, C., Jalkanen, J.-P., Brandt, J., Frohn, L. M., Im, U., Leung, W., Christensen, J.H., 2021. Projections of shipping emissions and the related impact on air pollution and human health in the Nordic region Atmos. Chem. Phys., 21, 12495–12519, 2021. <https://doi.org/10.5194/acp-21-12495-2021>

Hertel, O., Ellermann, T., Andersen, M.S., Sigsgaard, T. (2019): Redegørelse om ny tysk opgørelse af helbredseffekter af luftforureningen. Notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi Dato: 28-03-2019.

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., Raucchi, 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/Pollution-Prevention/AirPollution/Documents/ Third Greenhouse Gas Study/GHG3 Executive Summary and Report.pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pollution-Prevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf).

Jensen, S.S., Brandt, J., Christensen, J.H., Geels, C., Ketzel, M., Plejdrup, M. S., Nielsen, O.-K. (2018): Kortlægning af luftforureningens helbreds- og miljøeffekter i Region Hovedstaden, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 127 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 254. <http://dce2.au.dk/pub/SR254.pdf>

Jensen, S.S., Winther, M., Løfstrøm, P., Ketzel, M., Frohn, L.M. 2021a. 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>

Jensen, S. S., Brandt, J., Ketzel, M., Ellermann, T., Nielsen, O.-K. Plejdrup, M.S., Winther, M., Andersen, M.S., Sigsgaard, T. 2021b: Helbredseffekter af Black Carbon i Københavns Kommune. DCE-Nationalt Center for Miljø og Energi, 74s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 430, <http://dce2.au.dk/pub/SR430.pdf>

Jørgensen, H. 2017: Data tilsendt fra Færgen A/S.

Kristensen, H.O. 2017: Data for små færger leveret af Mariningeniør Hans Otto Holmegaard Kristensen.

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

Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Pöschl, U., Fnais, M., Daiber, A., Münzel, T. (2019): Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. European Heart Journal (2019) 0, 1–7, [doi:10.1093/eurheartj/ehz135](https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz135).

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

Miljøstyrelsen, 2021: <https://mst.dk/luft-stoej/luft/luftforurening-fra-skibe/saadan-forebygger-vi-luftforureningen-fra-skibe/>. Besøgt 4.1.2021.

Mortensen, L. 2015: Data tilsendt fra FærgeSelskabet Læsø.

Nielsen, D. 2019: Data tilsendt fra Molslinjen.

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>.

Plejdrup, M.S., Nielsen, O.-K., Gyldenkærne, S. & Bruun, H.G. (2018): Spatial high-resolution distribution of emissions to air – SPREAD 2.0. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 186 pp. Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy No. 131 <http://dce2.au.dk/pub/TR131.pdf>

Rasmussen, T., 2017: Data undersøgt for små færges, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi.

Rasmussen, H. 2019: Data tilsendt fra Royal Arctic Line.

Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, 2005: A description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR Tech Notes-468+STR.

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

Teknologisk Institut, 2020. Oplysninger leveret af Seniorkonsulent Personlig kommunikation med Troels Dyhr Pedersen, Teknologisk Institut.

Teknologisk Institut, 2021. <https://www.teknologisk.dk/projekter/projekt-maritime-emissionsloesninger-i-kystnaere-farvande/37926>. Hjemmeside besøgt 9.9.2021.

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

Watkiss, Paul, Steve Pye and Mike Holland (2005): CAFE CBA: Baseline Analysis 2000 to 2020. Service Contract for Carrying out Cost-Benefit Analysis of Air Quality Related Issues, in particular in the clean Air for Europe (CAFE) Programme. April 2005. http://www.cafecba.org/assets/baseline_analysis_2000-2020_05-05.pdf.

WHO (2013): Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project. Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide.

WHO (2014): Health Impact Assessment and Cost Benefit Analysis. Implementation of the HRAPIE Recommendations for European Air Pollution CBA work. Final, January 2014.

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>.

REDUKTIONSPOTENTIALER FOR LUFTFORURENING FRA NATIONAL SØFART I DANMARK VED RETROFIT AF SCR OG PARTIKELFILTRE

Betydning for helbredseffekter og tilhørende eksterne omkostninger

Rapporten er et delprodukt i forbindelse med Fyrtårnsprojektet, 'Maritime Emissionsløsninger i Kystnære Farvande' finansieret under Miljøstyrelsens Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP). Aarhus Universitet har gennemført en konsekvensanalyse for helbredseffekter og samfundsmæssige omkostninger for et scenarie baseret på et maksimum scenarie, hvor alle skibe, hvor teknisk muligt, under national søfart tænkes udstyret med projektets demonstrerede emissionsteknologi.