

# Omkostninger ved luftforureningen i Danmark

Danmarks grønne nationalprodukt

Luftforureningen belaster det menneskelige helbred med sygdomme og for tidlig død, hvilket tillige medfører samfundsøkonomiske omkostninger. Modelsystemet EVA (Economic Valuation of Air Pollution) gør det muligt detaljeret at opgøre disse omkostninger for de enkelte kilder og sektorer, som bidrager til luftforureningen, baseret på "impact-pathway"-metoden. Det kombinerer den bedste viden om sundhedsbelastningen med økonomisk værdisætning,

understøttet af fintmaskede atmosfæriske modeller, der kan holde rede på luftforureningens emissioner. Artiklen præsenterer metoden, herunder overvejelser om hvordan værdien af et statistisk liv kan opgøres til dette formål. Desuden gives en oversigt over udviklingen i luftforureningens omkostninger i Danmark siden 1990, og de aktuelle omkostninger for Danmark og udlandet omtales.

## Udviklingslinjer i forskningen i luftforurening

Lige fra den tidlige industrialisering har det stået klart, at fabrikernes og kakkelovnenes røg og damp var skadelig for helbredet – folk, der kunne, søgte lindring for deres luftvejslidelser ved diverse sanatorier ved havet eller i bjergene, hvor luften var ren og frisk. At menneskets gennemsnitshøjde ligefrem begyndte at falde i takt med den tidlige industrialisering, har været kædet sammen med luftforureningen og de usunde levevilkår. Nyere forskning har da også påvist en signifikant sammenhæng mellem luftkvaliteten i barndommen og den opnåede voksenhøjde (Klis og Wronka, 2020).

Forureningsproblemerne blev igennem mange år håndteret gennem en fortyndingsstrategi med krav om højere skorstene, men med fremkomsten af massebilismen fra midten af 1960'erne forstærkedes igen eksponeringen for de helbredsbelastende emissioner i lav højde tæt på børn og voksne. Mens det i første omgang var luftforureningens forsurening af skove og søer, der havde tiltrukket sig miljøpolitisk opmærksomhed, rettedes interessen snart igen mod helbredsbelastningen.

Indsatsen for at opgøre de økonomiske omkostninger ved luftforureningen er en udløber af forsøringsdebatten og kravene til bilindustrien, der efter mange års tøven i slut-1980'erne blev pålagt skærpede emissionsnormer og krav om katalysatorer. De første røgrensningsanlæg til industrien i Europa måtte importeres helt fra Japan, der teknologisk og miljøpolitisk var 20 år forud for Vesten, men hvor store omkostninger var det samfundsøkonomisk rimeligt at pålægge kraftværker og bilindustri?

### MIKAEL SKOU ANDERSEN

Professor,  
Institut for Miljøvidenskab,  
Aarhus Universitet,  
msa@envs.au.dk

### JØRGEN BRANDT

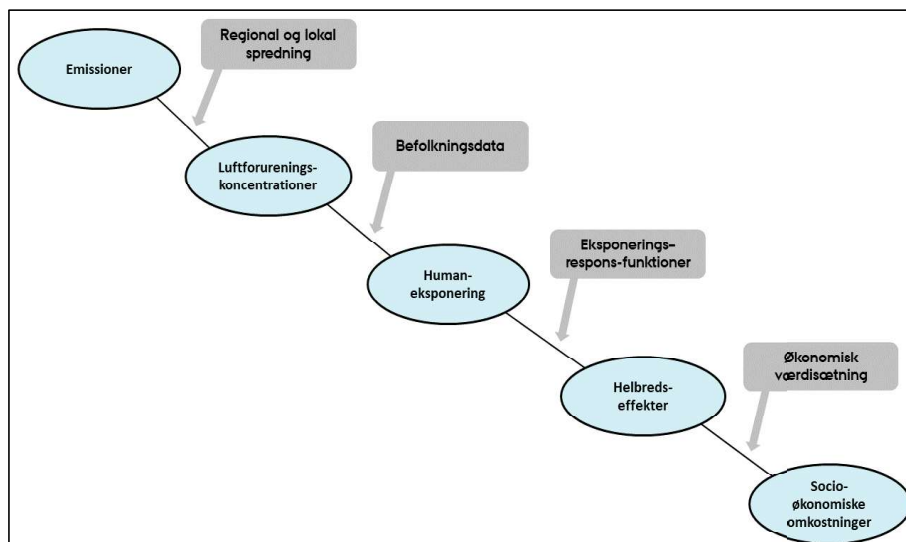
Professor,  
Institut for Miljøvidenskab,  
Aarhus Universitet,  
jbr@envs.au.dk

### LISE MARIE FROHN

Seniorforsker,  
Institut for Miljøvidenskab,  
Aarhus Universitet,  
lmf@envs.au.dk

For at få belyst dette spørgsmål søsatte forskningsprogrammer i EU og USA omkring 1990 det fælles finansierede ExternE-projekt, der gradvist udviklede den metode til at opgøre luftforureningens omkostninger, som vi i dag kender som ”impact pathway”-metoden – eller på dansk ”påvirkningsstiens” metode (Rabl og Peuportier, 1995 – se figur 1).

Figur 1: Påvirkningsstiens analysesekvens som grundlag for opgørelser af luftforureningens økonomiske omkostninger i EVA-modelsystemet (Economic Valuation of Air pollution)



Over de sidste 15-20 år har denne metode vundet indpas overalt i verden som en systematisk tilgang til at kombinere viden om sundhedsbelastningen med økonomisk værdisætning, understøttet af fintmaskede atmosfæriske modeller, der kan holde rede på luftforureningen. Det er den metode, som løbende anvendes af EU Kommissionen til forberedelse af nye direktiver til begrænsning af luftforureningen, ligesom metoden anvendes nationalt og lokalt i en række lande, herunder Danmark. Metoden sikrer en tæt sammenhæng mellem det naturvidenskabelige vidensgrundlag og de miljøøkonomiske beregninger gennem en interdisciplinær, integreret tilgang (Andersen og Clubb, 2013).

Danmark oprettede allerede i 1970, som en udløber af Forureningsrådets arbejde, et nationalt luftforureningslaboratorium med ansvar for at rapportere om luftforureningen. Det vedholdende videnskabelige arbejde igennem fem årtier ved dette laboratorium, der senere indgik i Danmarks Miljøundersøgelser, og i dag er en central del af Institut for Miljøvidenskab ved Aarhus Universitet, har sikret et solidt data- og modelmæssigt grundlag for at kunne regne på luftforureningens omkostninger både i Danmark og internationalt (Ellermann et al., 2023).

Formålet med denne artikel er i kort form at forklare, på hvilket grundlag vi i Danmark i dag kan opgøre omkostningerne ved luftforureningen ved anven-

delse af impact-pathway-metoden, hvilket sker indenfor modelkomplekset EVA (Economic Valuation of Air pollution) (Brandt et al., 2013).

Metoden følger, hvordan emitterede luftforureningskomponenters transport, spredning og kemiske omdannelse påvirker luftkvaliteten, dvs. koncentrationerne af forurenende stoffer i luften. Med viden om, hvordan det menneskelige helbred statistisk set responderer på eksponering for koncentrationerne, kan omfanget af sygdom og for tidlig død anslås. Disse effekter kan derpå tillægges økonomiske værdier, hvorved omkostningen for samfundet kan estimeres.

Slutteligt kan man ved at dividere omkostningen med de oprindelige emissioner komme frem til enhedspriser per kilo emission. Disse enhedspriser er nyttige i forhold til opgørelse af grønt BNP samt i samfundsøkonomiske analyser af virkemidler (se f.eks. Jensen et al., 2020).

Eksempelvis spiller beregningspriserne ofte ind i klimaøkonomiske analyser, da der er betydelige økonomiske sidegevinster ved klimatiltag, der medfører reduktioner i den konventionelle luftforurening. Den økonomiske værdi af reduktioner i drivhusgasserne, f.eks. ved omstilling til vindenergi, har ofte været overgået af den økonomiske værdi af reduktionerne i den konventionelle luftforurening med partikler, svovl, kvælstofoxider mv.

## Forureningsbelastning af helbredet fører til tidlig død

Den amerikanske økonom Clive Arden Pope var i 1995 hovedforfatter på det videnskabelige studie, der for alvor rettede opmærksomheden mod luftforureningen med små – også kaldet fine – partikler (Pope et al., 1995). Sådanne partikler fremkommer som direkte emissioner fra forbrænding, men også indirekte ved kemiske omdannelser i luften. Emissionerne kan stamme fra mange forskellige typer af brændsler, både fossile og biobaserede, og er som regel ikke synlige for det blotte øje.

Ved at analysere data for helbred og dødelighed fra godt 500.000 borgere indsamlet af USA's Cancer Society, herunder med registrering af de faktiske dødsårsager, og sammenholde med data for luftforureningsniveauerne kunne der i Pope's studie påvises en overdødelighed blandt voksne betinget af koncentrationen af fine partikler (betegnet  $PM_{2,5}$ ; partikler med en diameter mindre end 2,5 mikrometer) selv efter kontrol for en række andre variable (rygning, uddannelse mv.).

Den amerikanske miljøstyrelse, EPA, som ikke var tilbøjelig til umiddelbart at acceptere dette forskningsresultat, foranstaltede en kontrol-analyse af data, udført af en anden forskergruppe. Nogle år senere kunne den rapportere resultater, der fuldt ud bekræftede den oprindelige undersøgelse, nemlig en overdødelighed stigende med partikkelkoncentrationen. For hver 10 mikrogram  $PM_{2,5}$  per kubikmeter luft steg overdødeligheden med godt 4 pct. Overdødeligheden fandtes især indenfor luftvejslidelser og hjertekarsygdomme,

hvilket er i god overensstemmelse med vidensgrundlaget om, hvordan indånding af forurenede luft påvirker den menneskelige organisme. Både åndedrætsorganerne og blodcirkulationen belastes – omend de præcise biologiske mekanismer stadig søges afdækket.

De klassiske tidsseriestudier havde fokuseret på enkeltstående forureningsbegivenheder som ”London-tågen” i 1956, der over en kort periode udløste ca. 7.000 akutte dødsfald. Pope's kohorte-studie fulgte en befolkningsgruppe over flere årtier og påviste, at den kroniske belastning ved kontinuert over flere år at leve i og med forurenede luft havde tilsvarende konsekvenser igennem gradvis nedslidning af helbredet, især blandt ældre og sygdomssvækkede. Stigningen i dødelighed med højere partikel-koncentrationer kunne dog også konstateres indenfor kategorien lungekræft.

Over de seneste 25 år er der overalt i verden gennemført over tusind studier af luftforureningens konsekvenser for sundheden, der peger i samme retning som Popes studie, men som ofte kommer til forskellige estimater for de præcise sammenhænge mellem eksponering og respons. Pope og kolleger gennemførte selv en opdatering af analysen få år senere, hvor de med data for endnu et årtis dødsfald og luftforurening opjusterede estimatet for overdødeligheden til 6 pct. per 10 mikrogram  $PM_{2,5}$  per kubikmeter (Pope et al., 2002). Denne løbende opdatering af vores viden om luftforureningens helbredsbelastning er på den ene side en udfordring for, hvilke præcise antagelser om sammenhængen til luftforureningen der kan lægges til grund for økonomiske opgørelser af omkostningerne; på den anden side tillader metoden relativt smidigt en gradvis opdatering af forudsætningerne.

Verdenssundhedsorganisationen, WHO, har imidlertid foranstaltet ekspertvurderinger af vidensgrundlaget og givet anbefalinger til de samfundsøkonomiske opgørelser. Den seneste syntese fra 2021 opjusterer estimatet for overdødeligheden yderligere til 8 pct., ligesom den kommer med estimater for helbredseffekterne af andre luftforureningskomponenter (ozon, svovldioxid og nitrogendioxid), baseret på et meta-studie af de publicerede videnskabelige studier (WHO, 2021). Syntesens opjustering bekræftes i et stort studie af hele den danske befolkning over fire årtier (Raaschou-Nielsen et al., 2020).

Sygdomseffekterne relateret til luftforureningen har også været gennemgået af WHO, om end vidensgrundlaget er mere spinkelt end angående dødelighed (WHO, 2013). WHO's eksperter er dog enige om at udpege eksponeringsrespons funktioner relateret til lungekræft, kronisk obstruktiv lungesygdom, visse hospitalsindlæggelser med åndedrætslidelser og hjertekar-lidelser samt forbrug af astma og hostemedicin hos børn og voksne. For disse helbredseffekter vurderes det ud fra de publicerede videnskabelige studier, i hvilket omfang luftforureningens forskellige komponenter udløser en merforekomst af sygdommene i befolkningen.

I den nyere forskning er der endvidere påvist mulige sammenhænge til en række andre sygdomme, herunder f.eks. Parkinsons, diabetes og visse psy-

kiske lidelser (ADHD m.fl.), ligesom luftforureningen i nogle studier vises at kunne forklare merforekomst af astma. Disse effekter er endnu ikke vurderet af WHO, hvis anbefalinger derfor må vurderes som relativt forsigtige - men også robuste minimumsskøn.

## De økonomiske omkostninger ved tabte leveår og sygdom

Der er en lang tradition for at værdisætte tab af menneskeliv i den transport-økonomiske teori og praksis. Når der regnes på vej- og jernbane-projekter, indregnes rutinemæssigt effekterne på forekomsten af ulykker, herunder ulykker med dødelig udgang – og antallet af flere eller (som oftest) færre omkomne tillægges en økonomisk værdi. Selvom litteraturen omtaler denne størrelse som ”værdien af et statistisk liv”, er der rettelig tale om betalingsviljen for en risiko-reduktion, typisk risikoen for at omkomme i trafikken.

Denne økonomiske værdi kan aflæses i, hvad befolkningen er villig til at betale for ekstra sikkerhedsudstyr i bilen, f.eks. prisen for ekstra airbags i forhold til deres forventede effekt. Hvis betalingsvilligheden eksempelvis er 2.000 kroner for et udstyr, der mindsker risikoen for at omkomme i trafikken med 1/500, så indebærer det, at værdien af et statistisk liv udgør 1.000.000 kroner (500x2000).

Betalingsvilligheden kan imidlertid også belyses direkte gennem survey-undersøgelser ved såkaldt betinget værdisætning. Her præsenteres respondenterne for forskellige valgmuligheder med hensyn til kombinationen af risiko og betalingsvillighed med henblik på at afdække deres egentlige præferencer, som de måske ikke i dagligdagen har overvejet så systematisk f.eks. ved tilvalget af en ekstra airbag. I Danmark har Det Økonomiske Råd gennemført en sådan undersøgelse med henblik på at komme frem til en anbefalet værdi til anvendelse i samfundsøkonomiske analyser (DØRS, 2016). Analysen, baseret på en repræsentativ stikprøve af befolkningen, indikerede, at værdien af et statistisk liv i Danmark kan sættes til 31 millioner kroner målt i 2015-priser, hvilket også lægges til grund i opgørelsen af omkostningerne ved luftforureningen. Værdien flugter meget godt med resultaterne i en meta-analyse af tilsvarende undersøgelser publiceret i den internationale litteratur, når der tages højde for, at Danmark har et relativt højt BNP per indbygger (OECD, 2012).

Imidlertid er der nogle centrale forskelle mellem dødsfald i trafikken og dødsfald som følge af luftforurening. Mens det gennemsnitlige trafikoffer ifølge Danmarks Statistik er en midaldrende person, så vurderes det, at ofrene for luftforureningen fortrinsvis er ældre personer over 75 år (Andersen, 2019). Forskellen indebærer, at det gennemsnitlige offer i trafikken taber flere forventede leveår end det gennemsnitlige offer for luftforureningen – 30-35 år i trafikken mod ”kun” 10-12 år som følge af luftforureningen. Betalingsvilligheden for risiko-reduktion er endvidere i nogle studier vist at variere med alder.

Desuden er der den forskel, at dødsfald i trafikken sker akut, mens de fleste luftforureningsdødsfald sker som følge af en kronisk eksponering, der løber

over et længere åremål. Man taler derfor om, at de forureningsbetingede dødsfald er kroniske (det kan indvendes, at alle dødsfald sker "akut", men sondringen mellem akut og kronisk angår eksponeringen og ikke selve dødsfaldet).

Med disse forskelle in mente er det blevet problematiseret, om det er rimeligt at tillægge undgåede dødsfald som følge af luftforurening samme økonomiske værdi som undgåede dødsfald i trafikken.

I USA førte dette til en ophedet debat i Kongressen, hvor et flertal tog afstand fra den såkaldte "senior death discount" (ældre-dødsfalds-rabat). Argumentet lød, at ældres liv har lige så meget værdi for samfundet som yngres, og at der ikke skulle gøres forskel. Som følge af denne vedtagelse anvender amerikanske myndigheder siden da en fælles og ensartet værdi for statistisk liv uden differentiering for antallet af tabte leveår. Ud fra en nytteetisk synsvinkel kan man imidlertid indvende, at metoden kan medføre en favorisering og prioritering af risiko-reduktioner for ældre i forhold til yngre.

I ExternE-forskningsprojektet ræsonnerede man anderledes. For det første udviklede man en metode, der ved hjælp af levetidstabeller kan opgøre antallet af tabte leveår ud fra den konstaterede sammenhæng mellem luftkvaliteten og dødeligheden. For det andet sluttede man, at værdien af et statistisk liv – typisk udledt i undersøgelser med trafikulykker som udgangspunkt – måtte repræsentere den økonomiske betalingsvilje for en risiko-reduktion hos en midaldrende med cirka 40 tilbageværende leveår. Altså måtte værdien af et statistisk liv repræsentere summen af værdien af disse 40 leveår, og værdien af et enkelt leveår kan dermed beregnes ved at opgøre den tilbagediskonterede enhedsværdi af disse leveår (OECD, 2012). Som følge af denne beregningsmetode bliver værdien af et leveår noget højere end ved en simpel division med 40 – styret af den valgte diskonteringsrate: jo højere diskonteringsrate, jo højere værdi af et enkelt leveår.

EU Kommissionen og de forskellige EU-lande, inklusive Danmark (jf. Finansministeriet, 2019), anvender metoden udviklet af ExternE, hvor antallet af tabte leveår opgøres og værdisættes. OECD's vejledning i samfundsøkonomiske analyser for miljøsektoren anbefaler ligeledes metoden med værdisætning af tabte leveår (OECD, 2006). Dog anfører OECD, at såfremt der forekommer akutte dødsfald som følge af forureningen, så bør disse værdisættes på samme måde som i forhold til trafikulykker. Men med de forureningsniveauer, vi aktuelt har i Danmark, udgør de kroniske dødsfald det altovervejende antal.

Antallet af tabte leveår ved luftforurening findes via en levetidstabel med overlevelsessandsynligheder for de enkelte årgange. Ved at introducere et scenarie i tabellen svarende til den forøgede dødelighed ved en stigning i luftforureningen på f.eks. 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  kan antallet af tabte leveår opgøres som forskellen mellem basistabellen og scenariet.

De samfundsøkonomiske omkostninger ved den sygelighed, der betinges af luftforureningen, overskygges i betydelig grad af omkostningerne ved for tid-

lig død og opgøres derfor lidt mere overordnet. I den velfærdsøkonomiske metode opgøres foruden de direkte og indirekte omkostninger ved sundhedsudbydelserne også det ledsagende produktivitetstab hos de personer, som ikke kan stå til rådighed for arbejdsmarkedet – samt selve velfærdstab for personerne og deres nærmeste ved sygeligheden. Mens der er gode datakilder til omkostningerne og produktivitetstab via Sundhedsstyrelsens DRG-database og Danmarks Statistiks databank, så er velfærdstabet dårligere belyst, også i en dansk sammenhæng. Der anvendes typisk en såkaldt cost-of-illness-tilgang, hvor velfærdstabet anslås som en andel af de direkte omkostninger ved sygdomsbehandlingen. De vigtigste poster i opgørelsen over sygdomsomkostningerne er antallet af sygedage og merforekomsten af kronisk obstruktiv lungesygdom (KOL) – en aggressiv lidelse, hvor lungefunktionen gradvis reduceres.

### Regionale og lokale luftforureningsmodeller med høj opløsning

Emissioner af kemiske stoffer til atmosfæren kan transporteres over lange afstande som luftforurening og medføre helbredseffekter både tæt på kilden (lokale effekter) og mange hundrede km væk (regionale effekter). Det sker med vinden, og undervejs sker der kemisk omdannelse samt afsætning på jordoverfladen både via nedbør (våddeposition) og direkte afsætning (tørdeposition). Den kemiske omdannelse sker, når de emitterede kemiske stoffer reagerer med hinanden og med andre stoffer, som er til stede i atmosfæren.

På denne måde omdannes f.eks. de primært emitterede gasser svovldioxid ( $\text{SO}_2$ ), nitrogenoxider ( $\text{NO}_x$ ) og ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) til bl.a. sekundært dannede partikler med delkomponenter af f.eks. sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) og ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Emissioner af  $\text{NO}_x$  og flygtige organiske stoffer (VOC) bidrager til ozon-kemien, som igen har indflydelse på mange andre kemiske reaktioner og dannelse af sekundære organiske partikelkomponenter. Der er tale om yderst komplekse og ikke-lineære relationer mellem de nævnte emissioner og ændringerne i luftens koncentrationer af både primære og sekundære forureningskomponenter.

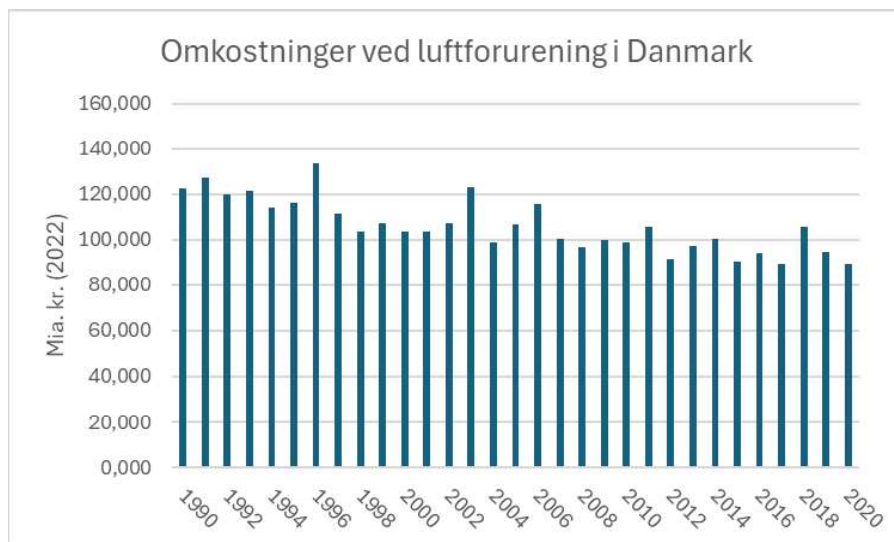
De komplekse fysiske og kemiske forhold i atmosfæren beskrives og modelleres i regional-skalamodellen den Danske Eulerske Hemisfæriske Model (DEHM) (Brandt o.a., 2012), som indgår i EVA modelsystemet. DEHM beregner ændringerne i luftkvaliteten i et lagdelt gitternet, bl.a. baseret på data for emissioner fra det europæiske samarbejde om overvågning af langtransporteret luftforurening (EMEP), og fra SPREAD-modellen for Danmark (Plejdrup o.a., 2021). DEHM modellerer både de fysiske og kemiske forhold i atmosfæren for 80 forskellige komponenter og forbindelser. DEHM er valideret for danske og europæiske forhold gennem mere end 30 år.

Med anvendelse af DEHM kan man, ud fra detaljerede beregninger af time-for-time-variationerne i koncentrationsværdierne, nå frem til årsmiddelværdier for de ændringer i luftkvaliteten, som kan henføres til ændringer i udlædningen fra de enkelte forureningskilder og/eller emissionssektorer. DEHM

opgør luftkvalitetsændringerne i fire forskellige koblede model-domæner, hvor opløsningen i modelberegningens gitternet er 5,6 km x 5,6 km over Danmark, 16,7 km x 16,7 km over Nordeuropa, 50 km x 50 km over det øvrige Europa og 150 km x 150 km over den øvrige nordlige halvkugle. Modellen tager således hensyn til interkontinental transport af luftforurening samt både naturlige og menneskeskabte emissioner, samtidigt med at der opnås relativt høj rumlig opløsning over Danmark. Dermed er det muligt i kombination med geografisk fordelte populationsdata at opgøre ændringer i eksponeringen af den befolkning, som befinder sig i det relevante område.

Beregningens præcision i forhold til helbredseffekter er meget afhængig af en fin opløsning i modellen, som kan opfange eksponeringen i forhold til, hvor befolkningen er lokaliseret – typisk genereres højere luftforureningskoncentrationer, netop hvor mange mennesker færdes. Til dette formål benyttes en lokalskalamodel, Urban Background Model (UBM; Brandt et al., 2001; Frohn et al., 2022), som beregner luftkvaliteten med en opløsning på 1 km x 1 km for Danmark, baseret på emissioner på samme opløsning. UBM er koblet til DEHM, som benyttes til at beregne effekterne i udlandet fra danske kilder, mens DEHM-UBM benyttes til at beregne omkostningerne ved den danske befolknings eksponering for luftforurening fra såvel danske som udenlandske kilder, samt bidragene fra de forskellige danske emissionssektorer inden for Danmark. DEHM-UBM-modelkomplekset anvendes endvidere til at beregne lokale omkostningstillæg for udledninger fra boligopvarmning og vejtrafik, under hensyntagen til befolkningstæthed i regionerne.

Figur 2: Løbende omkostninger 1990-2020 ved luftforureningen over Danmark, beregnet med EVA-modelkomplekset (version 7.1) i 2022-priser. Både antropogene og naturlige kilder i Danmark og udlandet er inkluderet.





## Trods forbedringer i luftkvaliteten stadig betydelige omkostninger ved luftforureningen

Figur 2 viser til brug for det grønne BNP en opgørelse af omkostningerne ved luftforureningen for det danske samfund baseret på EVA modelsystemet, herunder luftforureningsmodellerne og opgørelsesprincipperne skitseret i denne artikel – og opgjort i 2022-priser og med det vidensgrundlag om helbredseffekterne, der var gældende i 2020. Det ses af figuren, at siden 1990 har omkostningerne for Danmark ved luftforureningen været gradvist faldende fra et niveau omkring 120 mia. kr. årligt til godt 90 mia. kr. i 2020.

Omkostningerne inkluderer dels effekten af de danske emissioner på den danske befolkning, dels effekten af udlandets emissioner på det danske område, det vil sige luftkvaliteten over Danmark. De danske emissioner udgør kun en mindre del af den samlede omkostning for Danmark, mellem 10 pct. og 30 pct. afhængigt af årstal – den største omkostning for Danmark stammer fra importen af udlandets luftforurening til det danske område.

Da der sker en betydelig grænseoverskridende transport af luftforurening, har Danmark dog også selv en ganske stor eksport af luftforurening til nabolandene, som ikke er medregnet i denne opgørelse til brug for Danmarks grønne BNP.

Tabel 1: Luftforureningens omkostninger 2022 for udlandet og Danmark selv ved emissioner, der udspringer i Danmark

Eksterne omkostninger (mio. DKK <sub>2022</sub> ) ved luftforureningen fra danske emissioner				
Emission, stoffer	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PPM <sub>2,5</sub>	NH <sub>3</sub>
Helbredsrelaterede stoffer	SO <sub>2</sub> /SO <sub>4</sub>	O <sub>3</sub> /NO <sub>2</sub> / NO <sub>3</sub>	PPM <sub>2,5</sub> / SOA	NH <sub>4</sub>
Kronisk mortalitet	1.239	11.381	6.901	3.767
Indlæggelser	5	132	30	16
Astmatikere	0	1	0	0
Bronkitis/KOL	27	248	154	81
Sygedage mv.	88	1.113	500	266
Lungekræft	7	61	37	20
Akut mortalitet	391	5.954	1.544	821
Sum (mio. DKK <sub>2022</sub> )	1.757	18.891	9.167	4.972
Emissioner (tons)	8.602	89.571	11.978	70.801
Beregningspris (DKK <sub>2022</sub> pr. kg)	<b>204</b>	<b>211</b>	<b>765</b>	<b>70</b>
Heraf på dansk område	46%	12%	59%	17%
<i>Eksklusive lokale tillæg for vejtransport og brændeovne mv.</i>				

Tabel 1 viser overordnet omkostningerne for 2022 ved luftforurening forårsaget af danske emissioner. Det fremgår, at de samlede omkostninger fra danske emissioner for Danmark og nabolandene i dette år var i størrelsesordenen 35 mia. kr. Heraf falder størstedelen, i alt 25,5 mia. kr. i udlandet, mens omkostningerne for Danmark fra danske emissioner ”kun” andrager 9,3 mia. kr. for året. Vi eksporterede altså selv godt  $\frac{3}{4}$  af vores luftforurening.

Det er de primære partikler ( $PPM_{2,5}$ ), som med ca. 5,4 mia. kr. (9.167 mio. x 59 pct.) vejer tungest for den danske befolkning. Selvom kvælstof-oxiderne ( $NO_x$ ) umiddelbart udviser den største samlede omkostning, så spredes de gennem langtransporten, hvilket også gælder for svovl ( $SO_x$ ) og ammoniak ( $NH_3$ ) emissionerne. Dette ses, når man korrigerer sum-rækken i Tabel 1 med procenterne for det danske område.

Tabel 1 angiver beregningsprisen for de enkelte emissioner. Her kan de primære partikler ( $PPM_{2,5}$ ) noteres for den højeste enhedsomkostning, 765 kroner per kg i 2022-priser. Da 59 pct. af spredningen sker indenfor dansk område, vil man i ministeriernes samfundsøkonomiske analyser anvende 451 kroner (765 kr x 59 pct.) som beregningspris for værdien for Danmark af en reduktion af de danske emissioner. Forureningsbegrænsende tiltag, som f.eks. partikelfiltre til dieselmotorer, tillægges en velfærdsøkonomisk værdi i denne størrelsesorden, som holdes op mod omkostningen ved foranstaltningen. De primære partikler hidrører foruden fra trafikken særligt fra brændeovne. Da der er forskel på forbrændingsteknikkerne og skorstenshøjder i de forskellige sektorer af samfundet, er tabel 1 blot et gennemsnit; i realiteten opgøres de detaljerede beregningspriser for ni forskellige sektorer, hvorved analyserne tilnærmer de faktiske forhold. Desuden beregnes omkostningstillæg for byområder med høje befolkningskoncentrationer (se Brandt, Christensen og Andersen, 2023).

OECD (2006) anbefaler imidlertid, at den fulde enhedsomkostning for luftforureningen bør lægges til grund, således at effekterne på udlandet medregnes – dette fordi luftforureningsbelastningen er gensidigt anerkendt gennem internationale aftaler om at nedbringe den. Hvis man således fokuserer på omkostningerne ved de danske udledninger for både udlandet og Danmark selv, har omkostningsreduktionen siden 1990 været kraftigere end faldet i omkostningerne som følge af den forbedrede luftkvalitet over Danmark, godt 57 pct., bl.a. takket være udbygningen med vedvarende energi. Trods den positive udvikling siden 1990 forekommer omkostningerne imidlertid fortsat overordentligt høje. I øvrigt kan det bemærkes, at ved anvendelse af den amerikanske metode til værdisætning af for tidlig død (uden fokus på tabte leveår) ville opgørelsen resultere i omkostninger godt tre gange højere.

Det er endvidere ikke alle kendte effekter af luftforurening, som er medtaget i beregningerne. Særlig problematisk er det, at effekterne på naturen endnu ikke kan medregnes. Det er et område, der har haft begrænset forskningsmæssig opmærksomhed, men som der nu er taget hul på i et projekt under det nordiske samarbejde. Der er også økonomiske aspekter af helbredsomkostningerne, som endnu ikke medregnes, f.eks. tabt livskvalitet i årene med kronisk sygdom. Gennem det EU finansierede forskningsprojekt MARCHES (<https://projects.au.dk/marches>), der ledes ved Aarhus Universitet, sigter vi mod at kunne inddrage dette aspekt i fremtiden.

Gennem internationale konventioner og udmøntet i forskellige EU-direktiver er både Danmark og nabolandene forpligtet til yderligere reduktioner i luftforureningen i de kommende år, ligesom klimapolitikken med udfasning af fossile brændsler vil have en effekt. De beregnede omkostninger ved luftforurening er et væsentligt bidrag til at muliggøre, at dette kan ske på en samfundsøkonomisk hensigtsmæssig måde.

## Referencer

- Andersen, Mikael Skou (2017), "Co-benefits of climate mitigation: Counting statistical lives or life-years?", *Ecological Indicators*, 79: 11-18.
- Andersen, Mikael Skou og David Clubb (2013), "Understanding and accounting for the costs of inaction" i David Gee m.fl., red., *Late lessons from early warnings: Science, precaution, innovation*, Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Brandt, Jørgen, J.H. Christensen, L.M. Frohn, F. Palmgren, R. Berkowicz og Z. Zlatev (2001), "Operational air pollution forecasts from European to local scale", *Atmospheric Environment*, 35(Sup1): S91-S98.
- Brandt, Jørgen, J.D. Silver, L.M. Frohn, C. Geels, A. Gross, A.B. Hansen, K.M. Hansen, G.B. Hedegaard, C.A. Skjøth, H.V., A. Zare og 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*, 53: 156-76.
- Brandt, Jørgen, 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 og L.M. Frohn (2013), "Contribution from the ten major emission sectors in Europe to the Health-Cost Externalities of Air Pollution using the EVA Model System – an integrated modelling approach", *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13: 7725-46.
- Brandt, Jørgen, Jesper H. Christensen og Mikael Skou Andersen (2023), "Miljøøkonomiske beregningspriser for emissioner 4.0", *Notat 54*, Aarhus: DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet.
- DØRS (2016), "Økonomi og miljø 2016", København: De Økonomiske Råds Sekretariat.
- Ellermann, Thomas, C. Nordstrøm, J. Brandt, J.H. Christensen, M. Ketzel, A. Massling, R. Bossi, L.M. Frohn, C. Geels, S.S. Jensen, O. Nielsen, M. Winther, M.B. Poulsen, C. Monies, M.B. Sørensen, M.S. Andersen og T. Sigsgaard (2023), "Luftkvalitet 2021. Status for den nationale luftkvalitetsovervågning", *Videnskabelig rapport 533*, Aarhus: DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet.
- Finansministeriet (2019), "Dokumentationsnotat om værdien af statistisk liv og værdien af leveår", København.
- Frohn, Lise Marie, C. Geels, C. Andersen, C. Andersson, C. Bennet, J.H. Christensen, U. Im, N. Karvosenoja, P.A. Kindler, J. Kukkonen, S. Lopez-Aparicio, O. Nielsen, Y. Palamarchuk, V. Paunu, M.S. Plejdrup, D. Segersson, M. Sofiev og J. Brandt (2022), "Evaluation of multi-decadal high-resolution atmospheric chemistry-transport modelling for exposure assessments in the continental Nordic countries", *Atmospheric Environment*, 290: 119334.
- Jensen, Steen Solvang, J. Brandt, L.M. Frohn, M. Ketzel, M. Winther, M. Plejdrup og O. Nielsen (2020), "Helbreds-effekter og eksterne omkostninger af luftforurening i Københavns Kommune", *Videnskabelig rapport 348*, Aarhus: DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet.
- Klis, Katarzyna og Iwona Wronka (2020), "Associations between childhood and adolescence exposure to air pollution and adult height in polish women", *Environmental Research*, 189: 109965
- OECD (2006), *Cost-benefit analysis and the environment: recent developments*, Paris: Organization for Economic Cooperation and Development.
- OECD (2012), *Mortality risk valuation in environment, health and transport policies*, Paris: Organization for Economic Cooperation and Development.
- Pope, Clive Arden, M.J. Thun, M.M. Namboodiri, D.W. Dockery, J.S. Evans, F.E. Speizer og C.W. Heath Jr. (1995), "Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults", *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 151(3): 669-74.
- Pope, Clive Arden, R.T. Burnett, M.J. Thun, E.E. Calle, D. Krewski, K. Ito og G.D. Thurston (2002), "Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution", *Journal of the American Medical Association*, 1132-41.
- Plejdrup, Marlene Schmidt, O. Nielsen, S. Gyldenkærne og H.G. Bruun (2021), "Spatial high-resolution distribution of emissions to air – SPREAD 3.0", *Technical Report 215*, Aarhus: DCE – Danish Centre for Environment and Energy, Aarhus University.
- Rabl, Ari og Bruno Peuportier (1995), "Impact pathway analysis: a tool for improving environmental decision processes", *Environmental Impact Assessment Review*, 15: 421-42.
- Raaschou-Nielsen, Ole, E. Thorsteinson, S. Antonsen, G.J. Holst, T. Sigsgaard, C. Geels, L.M. Frohn, J.H. Christensen, J. Brandt, C.B. Pedersen og U.A. Hvidtfeldt (2020),

- “Air pollution and mortality in the Danish population – a nationwide study”, *EClinicalMedicine*, 28: 100605.
- WHO (2013), *Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project*, Copenhagen: World Health Organization.
- WHO (2021), *WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM<sub>2,5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*, Geneva: World Health Organization.