

---

# Helbredseffekter og eksterne omkostninger fra luftforurening i Danmark over 37 år (1979-2015)

Af J. Brandt<sup>1</sup>, M. S. Andersen<sup>1</sup>, J. H. Bønløkke<sup>2</sup>, J. H. Christensen<sup>1</sup>, T. Ellermann<sup>1</sup>, K. M. Hansen<sup>1</sup>, O. Hertel<sup>1</sup>, U. Im<sup>1</sup>, A. Jensen<sup>1</sup>, S. S. Jensen<sup>1</sup>, M. Ketzel<sup>1</sup>, O.-K. Nielsen<sup>1</sup>, M. S. Plejdrup<sup>1</sup>, T. Sigsgaard<sup>2</sup> og C. Geels<sup>1</sup>

---

**Ifølge WHO (1) udgør luftforurening nu den største miljømæssige sundhedsrisiko i verden. Dette har væsentlig betydning for udviklingen af velfærd og med store samfundsøkonomiske omkostninger som følge af ringere sundhed, øget dødelighed og større ulighed i fordelingen af velfærd – både for det enkelte menneske og for hele befolkningsgrupper. Med de seneste års forskning og udvikling af luftforureningsmodeller og viden om sammenhængen mellem luftforurening og helbred er vi nu i stand til at beregne helbredseffekter fra luftforurening med meget høj opløsning og over lange tidsperioder.**

## Beregning af helbredseffekter og eksterne omkostninger

På Aarhus Universitet har vi igennem de seneste ti år udviklet et integreret modelsystem, EVA (Economic Valuation of Air pollution) (2-8), baseret på den såkaldte "impact-pathway" metode, med det formål at kunne beregne helbredseffekter og de relaterede eksterne omkostninger fra luftforurening. Resultaterne benyttes til at kvantificere helbredseffekterne fra luftforurening generelt og til at understøtte politiske beslutninger med henblik på regulering af emissioner, baseret på den bedst tilgængelige viden (se f.eks.(6-7,9)).

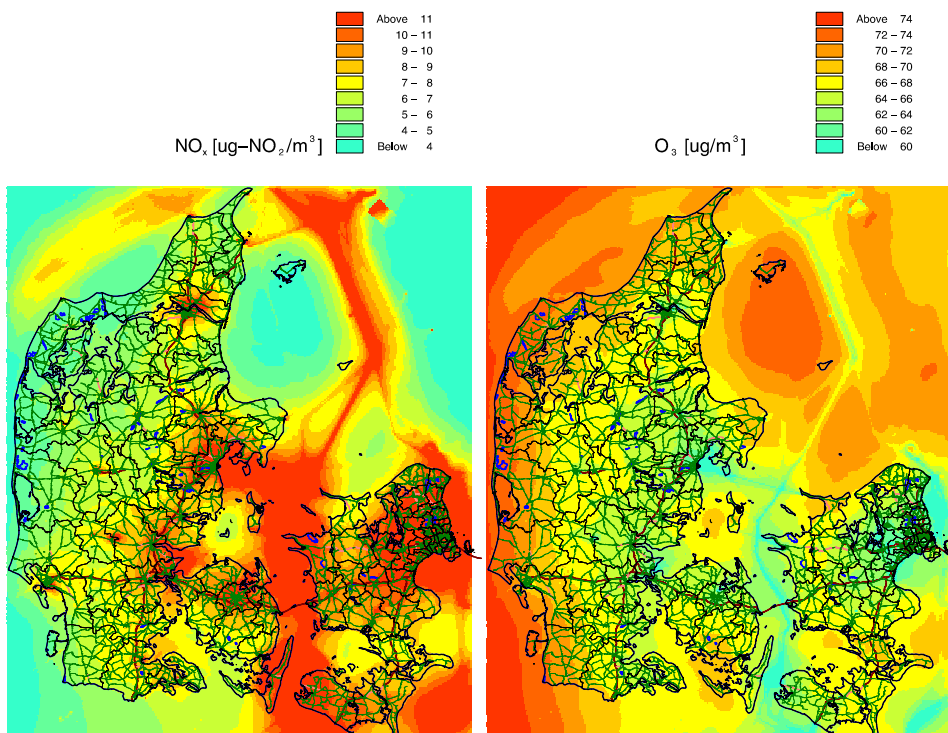
"Impact-pathway" kæden dækker alle leddene fra udslip af kemiske stoffer, som starter med forskellige kilder (både menneskeskabte og naturlige kilder), atmosfærisk transport med vinden, kemisk omdannelse samt afsætning til jordoverfladen, som beskrives i luftforureningsmodeller. Modellerne giver koncentrationer i luften af forskellige kemiske stoffer, som

sammen med detaljerede befolkningsdata kan bruges til at beregne humaneksponeringen. Beregning af effekter på menneskers helbred findes derefter ved brug af såkaldte eksponering-respons funktioner (ERF), som er baseret på utallige epidemiologiske studier, både i Danmark og studier rundt omkring i verden, som kan overføres til danske forhold. Til sidst værdisættes de enkelte helbredseffekter økonomisk i et samfundsmæssigt perspektiv. Den samlede omkostning af effekterne kaldes også for indirekte eller eksterne omkostninger - dvs. omkostninger, som man påfører samfundet og som ikke direkte medregnes i udgiften, f.eks. ved energiproduktion, biltransport eller industri.

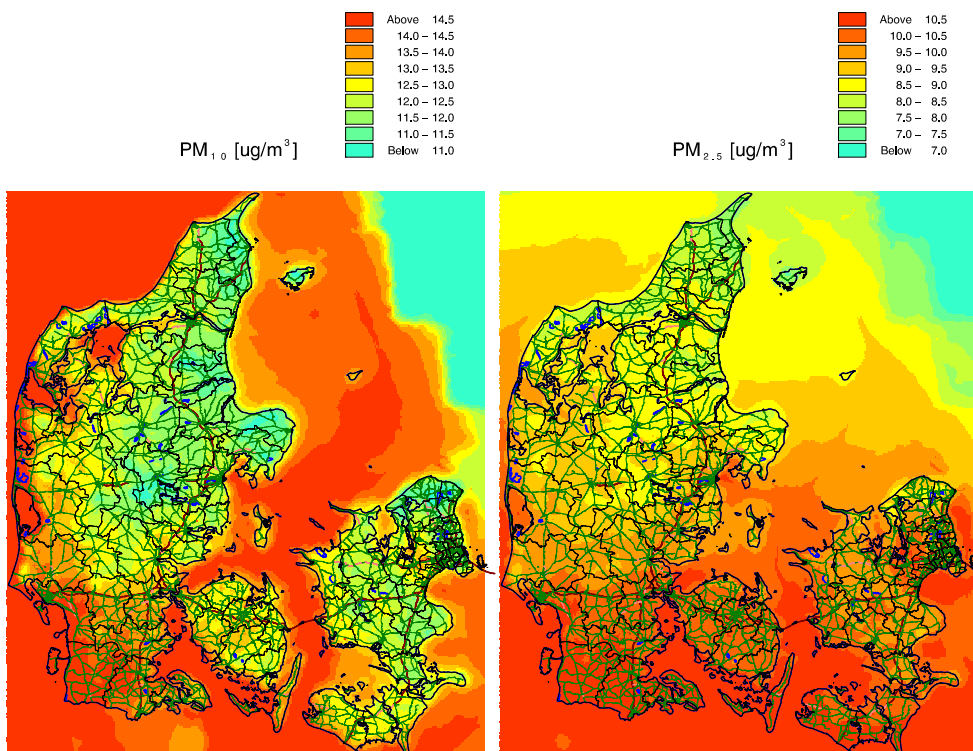
De kemiske stoffer, som er medtaget i EVA-systemet mht. helbredseffekter er: de primært (direkte) emitterede partikler med en diameter under 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>), herunder sod og støv, de sekundært dannede partikler sulfat, nitrat og ammonium (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> og NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), samt gasserne svovldioxid (SO<sub>2</sub>), kulmonoxid (CO) og ozon (O<sub>3</sub>).

## Beregning af luftforurening

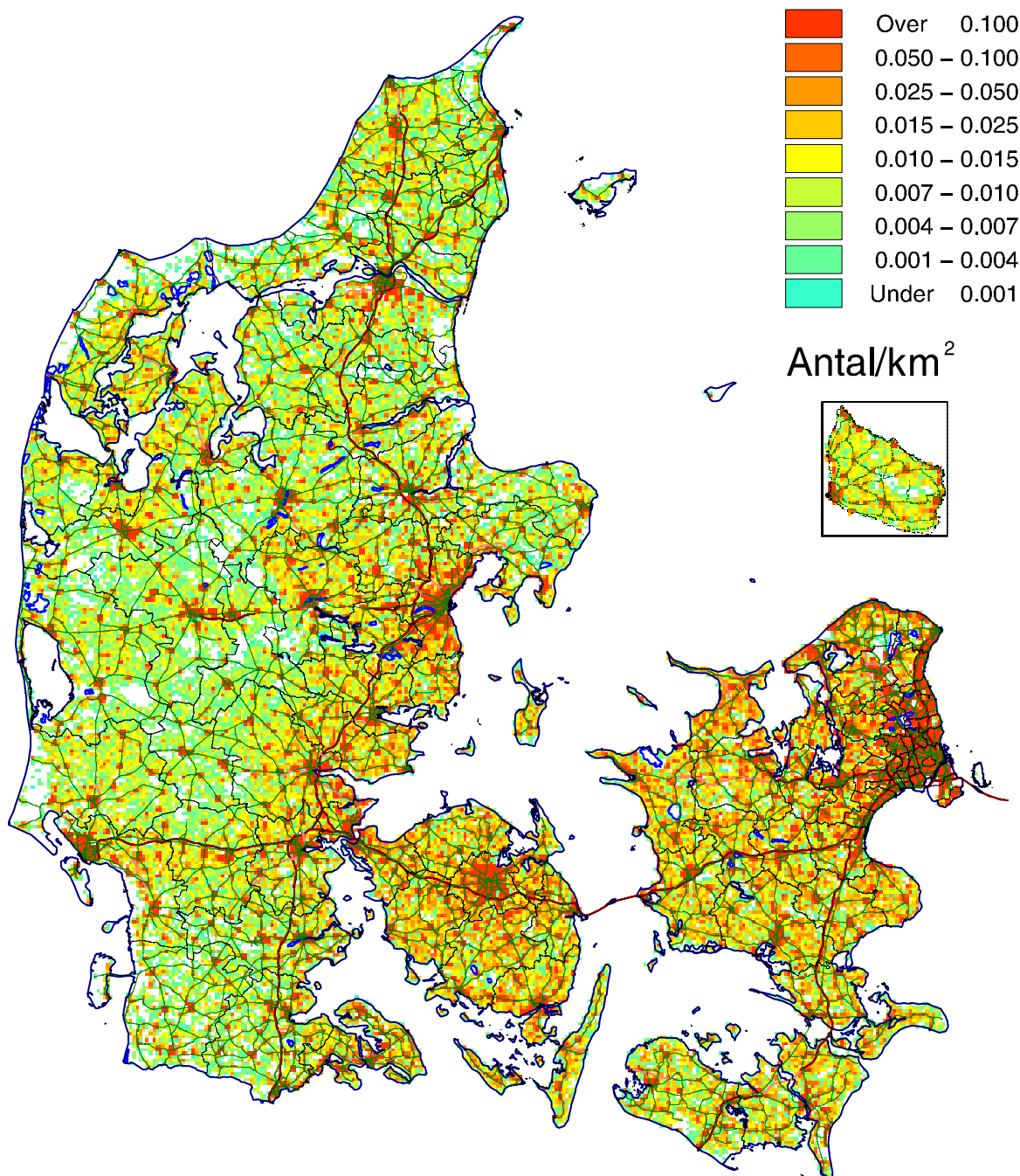
Luftforureningen over Danmark beregnes ved hjælp af luftforureningsmodeller, der er udviklet ved Aarhus Universitet. Det integrerede modelsystem THOR (10) indeholder bl.a. modeller, der dækker alle skalaer fra hele den nordlige halvkugle og ned på nationalt og lokalt niveau, da luftforurening kan transporteres med vinden over tusindvis af km. Luftforureningen på hemisfærisk og regional skala beregnes med Den Danske Eulerske Model (11-13). Modellen dækker hele den nordlige halvkugle for at kunne beskrive bidraget fra



Figur 1. Årsmiddelværdier af koncentrationer af kvælstofoxider (NO<sub>x</sub>) og ozon (O<sub>3</sub>) for 2015, beregnet med DEHM/UBM modelsystemet.



Figur 2. Årsmiddelværdier af koncentrationer af partikler med diameter under henholdsvis 10 µm og 2,5 µm (PM<sub>10</sub> er vist i venstre figur og PM<sub>2,5</sub> i den højre) for 2015, beregnet med DEHM/UBM modelsystemet.



Figur 3. Geografisk fordeling af antallet af for tidlige dødsfald, som skyldes langtidseksponering for PM<sub>2,5</sub>, samt korttidseksponering for ozon for året 2015, beregnet med EVA modelsystemet på 1 km x 1 km opløsning. De højeste antal for tidlige dødsfald findes i områder med højeste befolkningstæthed og højeste koncentrationer. Det totale antal for tidlige dødsfald for 2015 for hele Danmark, som skyldes langtidseksponering af PM<sub>2,5</sub>, er beregnet til ca. 3810. Hertil kommer antallet af for tidlige dødsfald, som skyldes korttidseksponering af ozon, som er beregnet til ca. 140. Det samlede antal for tidlige dødsfald som følge af luftforurening er dermed estimeret til ca. 3950 for år 2015.

---

andre kontinenter (f.eks. Amerika og Asien) og indeholder flere modeldomæner; to domæner over Europa med højere opløsning og ned til et modeldomæne, der dækker Danmark med 5,6 km x 5,6 km opløsning. For at få endnu højere opløsning er DEHM koblet til en lokalskala model, Urban Background Model (UBM) (14,10), der senest er videreudviklet til at dække hele Danmark med meget høj opløsning (1 km x 1 km). Både i DEHM og UBM modellerne indgår emissionsdata med den samme høje opløsning baseret på SPREAD modellen (15), der giver en geografisk fordeling af de nationale emissioner i Danmark. Den geografiske fordeling af emissioner er lavet med historiske data, så fordelingen dækker perioden 1990-2015. Før 1990 eksisterer der totale nationale emissioner for bl.a. udledning af kvælstofoxider, hvor den geografiske fordeling for 1990 er benyttet. DEHM inkluderer også opgørelser af internationale emissioner tilbage i tiden.

## Resultater

I det følgende præsenteres de overordnede resultater og konklusioner fra beregninger af helbredseffekter og eksterne omkostninger i Danmark fra luftforurening. Hele modelsystemet inkl. en meteorologisk model (WRF), den regionale model (DEHM), den lokale model (UBM) og EVA modelsystemet er kørt for alle årene 1979-2015 for at undersøge udviklingen i helbredseffekter og relaterede eksterne omkostninger i Danmark over de seneste 37 år. Eksempler på årsmiddelværdier for 2015 af koncentrationer af kvælstofoxider ( $\text{NO}_x$ ), ozon ( $\text{O}_3$ ), og massen af partikler med diameter under henholdsvis 10  $\mu\text{m}$  og 2,5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$  og  $\text{PM}_{2,5}$ ), beregnet med DEHM/UBM modelsystemet, er angivet i figur 1 og figur 2.

Det ses i figur 1, at de højeste koncentrationer af kvælstofoxider ( $\text{NO}_x$ ) optræder omkring de tættest befolkede områder i Danmark samt omkring skibsruterne, specielt pga. den internationale skibstrafik, der passerer Øresund og Storebælt. Det modsatte billede ses for ozon ( $\text{O}_3$ , figur 1). Her ses de laveste koncentrationer i de områder, hvor der er størst  $\text{NO}_x$  kon-

centrationer. Dette skyldes, at ozon ikke udledes direkte, men dannes kemisk ud fra emissioner af bl.a. kvælstofoxider og flygtige organiske forbindelser (også kaldet VOC). Omkring Danmark medvirker de danske  $\text{NO}_x$  emissioner til at mindske ozonkoncentrationerne, mens de medvirker til at danne ozon længere væk fra Danmark.

I figur 2, der viser beregnede koncentrationer af partikler med diameter under henholdsvis 10  $\mu\text{m}$  og 2,5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$  og  $\text{PM}_{2,5}$ ), ses, at en stor del af  $\text{PM}_{2,5}$  er transporteret med vinden fra de større emissionsområder i Europa (f.eks. Holland, Belgien og Tyskland), hvilket giver en nord-syd gradient med faldende koncentrationer længere mod nord. For  $\text{PM}_{10}$  (som også indeholder  $\text{PM}_{2,5}$ ) er der yderligere et bidrag af bl.a. havsalt fra havsprøjt, som bidrager væsentligt til den grove fraktion af  $\text{PM}_{10}$ . Tilsvarende beregninger af koncentrationer af alle de kemiske stoffer er desuden lavet for Bornholm, men figureerne er ikke vist her.

En af de alvorlige effekter af luftforurening er øget dødelighed både fra  $\text{PM}_{2,5}$  og ozon. Den geografiske fordeling af antallet af for tidlige dødsfald, som skyldes langtidseksponering af  $\text{PM}_{2,5}$ , samt korttidseksponering for ozon, for året 2015, beregnet med EVA modelsystemet på 1 km x 1 km opløsning, er vist i figur 3. De fleste for tidlige dødsfald findes i områder med højest befolkningstæthed og højeste koncentrationer. Det totale antal for tidlige dødsfald for 2015 for hele Danmark er beregnet til ca. 3810. Hertil kommer antallet af for tidlige dødsfald, som skyldes korttidseksponering af ozon, som er beregnet til ca. 140 for år 2015, sådan at det totale antal for tidlige dødsfald i Danmark fra luftforurening er ca. 3950.

EVA modelsystemet beregner 17 forskellige helbredseffekter fra luftforurening. I tabel 1 er vist antallet af de forskellige helbredseffekter fra den totale luftforurening fra både menneskeskabte og naturlige kilder i Danmark for årene 1979 og 2015 til sammenligning. Helbredseffekter omfatter bl.a. bronkitis/KOL, sygedage, hospitalsindlæggelser, lungecancer, hoste og for tidlige dødsfald. Det ses i tabel 1,

<b>Helbredseffekter</b>	<b>Antal tilfælde i Danmark, år 1979</b>	<b>Antal tilfælde i Danmark, år 2015</b>
Kronisk bronkitis	6.750	3.650
Dage med nedsat aktivitet (sygedage)	6.900.000	3.730.000
Hospitalsindlæggelser for luftvejslidelser	349	192
Hospitalsindlæggelser for cerebro-vaskulære lidelser	850	466
Tilfælde af hjertesvigt	564	349
Lungecancer	1030	559
Brug af bronkodilatator blandt børn	179.000	106.000
Brug af bronkodilatator blandt voksne	1.320.000	714.000
Episoder med hoste blandt børn	619.000	367.000
Episoder med hoste blandt voksne	1.360.000	735.000
Episoder med nedre luftvejssymptomer blandt børn	239.000	142.000
Episoder med nedre luftvejssymptomer blandt voksne	490.000	265.000
For tidlige dødsfald fra korttidseksposering af ozon	87	140
Tabte leveår (YOLL) fra langtidseksposering af partikler	71.900	40.400
Totalt antal for tidlige dødsfald	6.870	3.950
Dødsfald blandt spædbørn	7	4

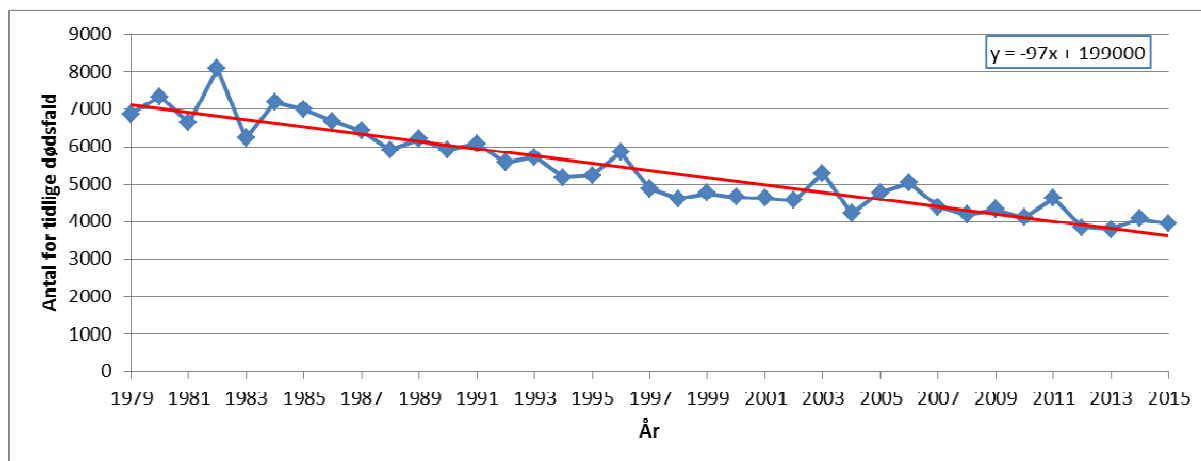
Tabel 1. Helbredseffekter fra den totale luftforurening fra både menneskeskabte og naturlige kilder i Danmark for årene 1979 og 2015.

at der er sket et betydeligt fald i antallet af de forskellige helbredseffekter fra 1979 til 2015, hvor f.eks. antallet af de totale antal for tidlige dødsfald er faldet fra ca. 6.870 til ca. 3.950. Befolkningsdata i EVA systemet er baseret på tal fra CPR registeret med geografisk fordeling givet i år 2000 og 2008, og disse er benyttet til at repræsentere de forskellige år, men skaleret i forhold til størrelsen af befolkningen i de enkelte år.

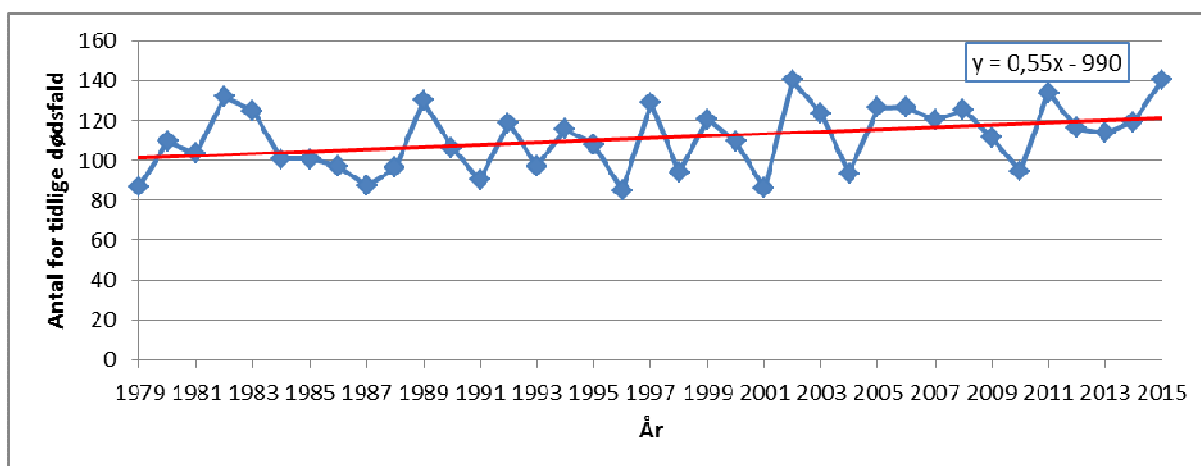
Hele modelkomplekset, inkl. Luftforureningsmodeller og EVA modelsystemet, er kørt for hvert enkelt af årene i perioden 1979 til 2015 for at undersøge udviklingen over tid mere detaljeret. I figur 4 er vist udviklingen af det totale antal for tidlige dødsfald per år i Danmark, som skyldes eksposering fra den totale masse af partikler med diameter mindre end 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>) og ozon (O<sub>3</sub>). Som det ses, er der et kraftigt fald fra over 8000 tilfælde i år 1982 til ca. 4000 tilfælde i år 2015. Faldet skyldes reguleringen af emissioner, specielt i Europa og Danmark, af de forskellige kemiske stoffer som resultat af forskellige EU direktiver

for emissionslofter for de enkelte lande samt andre internationale aftaler. Faldet er dog ikke så stort i de seneste år, hvor antallet af for tidlige dødsfald ligger omkring 4000 tilfælde per år. Udsvingene imellem de enkelte år skyldes forskelle i vejret, hvor 2003 f.eks. var et relativt tørt år med mindre nedbør og dermed mindre udvaskning af atmosfæriske partikler.

I figur 5 er vist udviklingen i antallet af for tidlige dødsfald, som skyldes korttidseksposeringen af ozon. I dette tilfælde er der tale om ozonkoncentrationer ved jordoverfladen, som generelt er skadelig for helbred og afgrøder, mens ozonen i ozonlaget ca. 20-25 km over jordoverfladen beskytter os mod solens ultraviolette stråler. Som det ses i figur 5 er antallet af for tidlige dødsfald som følge af ozon steget fra ca. 100 om året i begyndelsen af perioden til ca. 120-140 i slutningen af perioden. Dette er en overraskelse, idet emissioner af de gasser (NO<sub>x</sub>, VOC og CO), som er med til at danne ozon, er stærkt reguleret inden for EU igennem hele perioden og specielt siden 1990. Andre



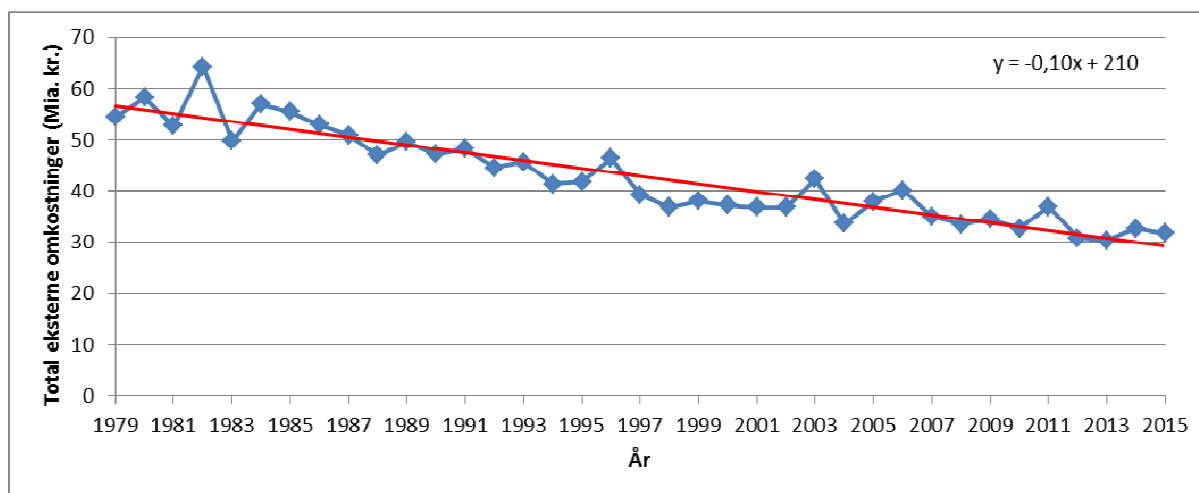
Figur 4. Udviklingen af det totale antal for tidlige dødsfald pr. år i Danmark, som skyldes eksponering for den totale masse af partikler med diameter mindre end 2,5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ) og ozon ( $\text{O}_3$ ), beregnet med EVA model systemet på 1 km x 1 km opløsning for perioden 1979-2015.



Figur 5. Udviklingen af det totale antal for tidlige dødsfald pr. år i Danmark, som skyldes eksponering for ozon ( $\text{O}_3$ ), beregnet med EVA model systemet på 1 km x 1 km opløsning for perioden 1979-2015.

undersøgelser har vist, at stigningen i ozon skyldes den globale stigning i udledningen af de gasser, der bidrager til ozondannelsen, specielt fra den sydøstlige del af Asien. Levetiden af ozon i atmosfæren kan være op til flere uger, og det er tid nok til at ozonen kan transporteres med vinden fra f.eks. Kina til Europa og Danmark. Generelt er baggrundsværdierne for ozon stigende, mens der sjældnere observeres meget høje koncentrationer i form af spidsværdier, hvor EU's grænse-

værdier er overskredet. Det sidste skyldes den europæiske regulering af emissionerne. I figur 6 er vist udviklingen i de totale helbredsrelaterede eksterne omkostninger fra luftforurening i Danmark, beregnet med EVA modelsystemet. De totale eksterne omkostninger er betragtelige; op mod 60 mia. kr./år i starten af perioden og ca. 30 mia. kr./år i slutningen af perioden, hvilket svarer til knap 2 % af Danmarks BNP i 2015.



Figur 6. Udviklingen i de totale årlige eksterne helbredsrelaterede omkostninger fra luftforurening i Danmark, beregnet med EVA model systemet på 1 km x 1 km opløsning for perioden 1979-2015. Enheden er i milliarder kr. (2013 priser) og værdisætning af helbredseffekter er baseret på Andersen & Brandt (2).

### NordicWelfAir projektet

En af de overordnede usikkerheder i forbindelse med beregning af helbredseffekter fra luftforurening er forbundet med spørgsmålet om, hvad det er ved atmosfæriske partikler, der er helbredsskadeligt. Dette er specielt vigtigt for at kunne regulere luftforurening på den mest optimale måde. Ifølge vores bedste viden er der en klar sammenhæng mellem koncentrationer af den totale masse af PM<sub>2,5</sub> og helbredseffekterne (16). PM<sub>2,5</sub> består af mange forskellige kemiske stoffer fra vidt forskellige kilder. Derfor er det vigtigt at kunne skelne mellem om det f.eks. er sodpartikler fra brændeovne, nitratpartikler fra udledning af kvælstofoxider, f.eks. fra trafik, eller ammoniumpartikler fra landbruget, der er mest helbredsskadelige, eller om de alle er lige skadelige, som vi forudsætter i de nuværende beregninger. Desuden kan helbredseffekterne være forskellige for forskellige befolkningsgrupper (f.eks. alder, køn, indkomst, uddannelse, mv.). I nærværende beregninger er effekten af de sekundære organiske partikler (også kaldet SOA) ikke medtaget, da der pt. arbejdes på at inkludere dem i model-systemet. Det forventes, at helbredseffekter og de relaterede eksterne omkostninger vil øges med omkring 10 %, når SOA tages med i beregningerne.

NordicWelfAir projektet vil bl.a. forsøge at besvare disse spørgsmål. Det overordnede formål med projektet er at forstå sammenhængen mellem luftforureningsniveauerne, den kemiske sammensætning af luftforureningen og de relaterede helbredseffekter. Desuden vil vi undersøge og vurdere effekterne fra luftforurening på fordelingen af velfærd i de nordiske lande, både på nationalt og individuelt niveau. NordicWelfAir forløber over årene 2015-2020 og er finansieret af NordForsk under deres program for sundhed og velfærd med 30 mio. norske kr. I alt er der 16 partnere fra alle de fem nordiske lande i det stærkt tværfaglige projekt, der vil bidrage med at lave emissionsopgørelser for hele Norden på 1 km x 1 km opløsning, beregninger af luftforurening over >25 år på samme høje opløsning for alle landene, epidemiologiske undersøgelser af sammenhængen mellem de enkelte luftforureningskomponenter og helbredseffekterne opdelt på forskellige befolkningsgrupper baseret på registerforskning, de relaterede eksterne omkostninger samt indflydelsen på den enkeltes velfærd og de nordiske velfærdssystemer. For yderligere oplysninger, se <http://NordicWelfAir.au.dk>.

---

## Taksigelse

Arbejdet i denne artikel er udført med finansiel støtte fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi under Aarhus Universitet med projektet ”Helbredseffekter og eksterne omkostninger fra luftforurening i Danmark over 25 år” og NordForsk under det Nordiske Program for sundhed og velfærd. Projekt #75007: “Understanding the link between air pollution and distribution of related health impacts and welfare in the Nordic countries (NordicWelfAir)”.

Yderligere information:

Jørgen Brandt

[jbr@envs.au.dk](mailto:jbr@envs.au.dk)

## Referencer

1. WHO, 2014.<sup>1</sup>
2. Andersen MS, Brandt J. *Miljøøkonomiske beregningspriser for emissioner*. Notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet, December 2014, 15 s.<sup>2</sup>
3. Brandt JJ, Silver D, Christensen JH, Andersen MS, Bønløkke JH, Sigsgaard T, Geels C, Gross A, Hansen AB, Hansen KM, Hedegaard GB, Kaas E, Frohn LM, *EVA - en metode til kvantificering af sundhedseffekter og eksterne omkostninger*. Miljø og Sundhed. Temanummer om helbredseffekter af vedvarende energi. Sundhedsstyrelsens Rådgivende Videnskabelige Udvalg for Miljø og Sundhed Formidlingsblad 2011, 17. årgang, suppl. 1, okt. 2011, pp 3-10.
4. Brandt J, Silver JD, Christensen JH, Andersen MS, Bønløkke J, Sigsgaard T, Geels C, Gross A, Hansen AB, Hansen KM, Hedegaard GB, Kaas E, Frohn LM, 2013a. *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*. Atmos Chem Phys 2013a;13:7725-46.
5. Brandt J, Silver JD, Christensen JH, Andersen MS, Bønløkke J, Sigsgaard T, Geels C, Gross A, Hansen AB, Hansen KM, Hedegaard GB, Kaas E, Frohn LM. *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 2013b;13:7747-64.
6. Brandt J, Jensen SS, Plejdrup MS. *Beregning af sundhedseffekter relateret til luftforurening i København og Frederiksberg ved brug af modelsystemet EVA*. Aarhus Universitet. Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi 2013c, nr. 64, 46 s. <http://dce2.au.dk/pub/SR64.pdf>
7. Brandt J, Christensen JH, Jensen SS. *Helbredseffekter af grænseoverskridende luftforurening til og fra Danmark*. Aarhus Universitet. Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi 2015, nr. 141, 46 s. <http://dce2.au.dk/pub/SR141.pdf>
8. Geels C, Andersson C, Hänninen O, Lansø AS, Schwarze P, Brandt J. *Future Premature Mortality due to Air Pollution in Europe – Sensitivity to Changes in Climate, Anthropogenic Emissions, Population and Building stock*. Int J Environ Res Public Health 2015;12: 2837-69. <http://www.mdpi.com/1660-4601/12/3/2837>
9. Jensen SS, Brandt J, Ketzler M, Plejdrup M. *Kildebidrag til sundhedsskadelig luftforurening i København*. Aarhus Universitet. Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi 2013 nr. 57, 85 s. <http://www2.dmu.dk/Pub/SR57.pdf>
10. Brandt J, Christensen JH, Frohn LM, Palmgren F, Berkowicz R, Zlatev Z. *Operational air pollution forecasts from European to local scale*. Atmos Environ 2001; Vol. 35, Sup. No. 1, pp. S91-S98.
11. Christensen JH, *The Danish Eulerian Hemispheric Model - a Three-Dimensional Air Pollution Model Used for the Arctic*. Atmos Environ 1997;31(24):4169-91.

<sup>1</sup> <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>

<sup>2</sup> [http://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater\\_2014/Miljoekonomiske\\_beregningspriser\\_for\\_emissioner.pdf](http://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2014/Miljoekonomiske_beregningspriser_for_emissioner.pdf)



- 
12. Frohn LM, Christensen JH, Brandt J. *Development of a high resolution nested air pollution model – the numerical approach*. J Comput Phys 2002;179:68-94.
  13. Brandt J, Silver JD, Frohn L, Geels C, Gross A, Hansen AB, Hansen KM, Hedegaard GB, Skjøth CA, Villadsen H, Zare A, Christensen JH. *An integrated model study for Europe and North America using the Danish Eulerian Hemispheric Model with focus on intercontinental transport*. Atmos Environ 2012;53:156-76.
  14. Berkowicz R. *A simple model for urban background pollution*. Environ Monit Assess 2000;65:259-67.
  15. Plejdrup MS, Gyldenkerne S. *Spatial distribution of emissions to air – the SPREAD model*. National Environmental Research Institute, Aarhus University, Denmark, NERI, Technical Report no. FR823, 72 pp., 2011.  
<http://www.dmu.dk/Pub/FR823.pdf>
  16. Ellermann T, Brandt J, Hertel O, Loft S, Andersen ZJ, Raaschou-Nielsen O, Bønløkke J, Sigsgaard T. *Luftforureningens indvirkning på sundheden i Danmark - Sammenfatning og status for nuværende viden*. Aarhus Universitet. Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi 2014, nr. 96, 154 s.  
<http://dce2.au.dk/pub/SR96.pdf>