



LUFTKVALITET 2021

Status for den nationale luftkvalitetsovervågning i Danmark

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 533

2023



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

LUFTKVALITET 2021

Status for den nationale luftkvalitetsovervågning i Danmark

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 533

2023

Thomas Ellermann
Claus Nordstrøm
Jørgen Brandt
Jesper Christensen
Matthias Ketzel
Andreas Massling
Rossana Bossi
Lise Marie Frohn
Camilla Geels
Steen Solvang Jensen
Ole-Kenneth Nielsen
Morten Winther
Maria Bech Poulsen
Christian Monies
Martin Ole Bjært Sørensen
Mikael Skou Andersen
Torben Sigsgaard

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. 533
Titel:	Luftkvalitet 2021
Undertitel:	Status for den nationale luftkvalitetsovervågning i Danmark
Kategori:	Rådgivningsrapporter
Forfattere:	Thomas Ellermann, Claus Nordstrøm, Jørgen Brandt, Jesper Christensen, Matthias Ketzel, Andreas Massling, Rossana Bossi, Lise Marie Frohn, Camilla Geels, Steen Solvang Jensen, Ole-Kenneth Nielsen, Morten Winther, Maria Bech Poulsen, Christian Monies, Martin Ole Bjært Sørensen, Mikael Skou Andersen og Torben Sigsgaard
Institution:	Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	Marts 2023
Redaktion afsluttet:	Februar 2023
Faglig kommentering:	Kaj Mantzius Hansen, Institut for Miljøvidenskab
Kvalitetssikring, DCE:	Vibeke Vestergaard Nielsen
Sproglig kvalitetssikring:	Vibeke Vestergaard Nielsen
Ekstern kommentering:	Miljøstyrelsen. Kommentarerne findes her: http://dce2.au.dk/pub/komm/533_komm.pdf
Finansiel støtte:	Miljøministeriet
Bedes citeret:	Thomas Ellermann, Claus Nordstrøm, Jørgen Brandt, Jesper Christensen, Matthias Ketzel, Andreas Massling, Rossana Bossi, Lise Marie Frohn, Camilla Geels, Steen Solvang Jensen, Ole-Kenneth Nielsen, Morten Winther, Maria Bech Poulsen, Christian Monies, Martin Bjært Sørensen, Mikael Skou Andersen og Torben Sigsgaard. 2023. Luftkvalitet 2021. Status for den nationale luftkvalitetsovervågning. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 148 s. - Videnskabelig rapport nr. 533. http://dce2.au.dk/pub/SR533.pdf
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Rapporten giver en status for 2021 fra den nationale overvågning af luftkvaliteten i Danmark, som har fokus på forureningen i byerne. Formålet med overvågningen er at dokumentere status og følge udviklingen i luftkvaliteten med henblik på at påvise effekten af reduktionstiltag. Endvidere præsenteres data fra de nationale emissionsopgørelser samt resultater fra omfattende modelberegninger af status for og kilderne til helbredseffekterne herunder de økonomiske omkostninger i relation til luftforureningen. I 2021 blev luftkvaliteten målt i de fire største byer og ved fire målestationer i baggrundsområder uden for byerne. I 2021 blev der ikke målt overskridelser af EU's grænse- og målværdier i Danmark, mens hovedparten af WHO's retningslinjer for luftkvalitet fra 2021 blev overskredet. Endvidere blev der gennemført modelberegninger for luftkvaliteten i Aalborg og København. Modelberegningerne viste ingen overskridelse af grænseværdien, men overskridelse af WHO's retningslinjer for luftkvalitet. Luftkoncentrationerne har for langt de fleste luftforureningskomponenter været faldende gennem de seneste årtier, hvilket skyldes faldet i udledningerne i Danmark og de øvrige europæiske lande. Modelberegningerne af helbredseffekterne viser, at der i 2021 var omkring 3.900 for tidlige dødsfald, samt en række andre helbredseffekter som følge af luftforureningen. Antallet af for tidlige dødsfald som følge af luftforureningen er faldet med omkring 52% siden 1990..
Emneord:	Luftkvalitet, luftforurening, kvælstofdioxid, carbonmonoxid, svovldioxid, tungmetaller, ozon, benzen, partikelforurening, PM _{2.5} , PM ₁₀ , flygtige organiske forbindelser, udledninger af luftforurening, helbredseffekter, kilder, samfundsmæssige omkostninger
Layout:	Majbritt Pedersen-Ulrich
Foto forside:	Thomas Ellermann
ISBN:	978-87-7156-749-6
ISSN (elektronisk):	2244-9981
Sideantal:	148
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som http://dce2.au.dk/pub/SR533.pdf

Indhold

Indhold	3
Sammenfatning	5
Opgørelse over udledninger af luftforurening	5
Status og udvikling for luftkvalitet	7
Helbredseffekter og økonomiske omkostninger af luftforureningen	11
Summary	14
Emission inventories	14
State and long-term trends of the air quality	16
Health effects and economic costs of air pollution in Denmark	20
1. Indledning	23
1.1 Opgørelse af udledninger	24
1.2 Målenetværk	26
1.3 Målemetoder	28
1.4 Modelberegninger	29
1.5 Helbredseffekter og økonomiske omkostninger som følge af luftforureningen	33
2. Kvælstofdioxid, NO₂ og kvælstofoxider, NO_x	36
2.1 Udledninger	36
2.2 Status for luftkvalitet	38
2.3 Udviklingstendens	39
2.4 Modelberegninger	41
3. Carbonmonoxid, CO	51
3.1 Udledninger	51
3.2 Status for luftkvalitet	53
3.3 Udviklingstendens	54
4. Svovldioxid, SO₂	56
4.1 Udledninger	56
4.2 Status for luftkvalitet	58
4.3 Udviklingstendens	59
5. Flygtige organiske forbindelser, VOC	61
5.1 Udledninger	61
5.2 Status for luftkvalitet	63
5.3 Udviklingstendens	65
6. Ozon, O₃	66
6.1 Status for luftkvalitet	66
6.2 Udviklingstendens	67
6.3 Modelberegninger	68
7. Luftbårne partikler	71

7.1	Udledninger	72
7.2	Status for luftkvalitet	75
7.3	Udviklingstendens	77
7.4	Modelberegninger	82
8.	Elementært – og organisk kulstof	86
8.1	Udledninger	87
8.2	Status for luftkvalitet	88
8.3	Udviklingstendens	89
9.	Tungmetaller	91
9.1	Udledninger	92
9.2	Luftkvalitet	93
9.3	Udviklingstendens	95
10.	Polycykliske aromatiske kulbrinter og benz[a]pyren	98
10.1	Udledninger	98
10.2	Status for luftkvalitet	100
10.3	Udviklingstendens	101
11.	Den kemiske sammensætning af fine partikler	102
11.1	Kilderne til de uorganiske ioner	102
11.2	Status for 2021	103
12.	Helbredseffekter og samfundsmæssige omkostninger relateret til luftforurening	108
12.1	Status og trends for helbredseffekter	111
12.2	Status for luftforureningens omkostninger som følge af helbredseffekter	115
12.3	Kilder til helbredseffekter af luftforureningen i Danmark i 2021	115
12.4	Danske og udenlandske kilder til omkostningerne fra luftforureningen i Danmark 2021	120
12.5	Usikkerhed og perspektiver for de fremtidige beregninger	125
13.	Luftkvalitet og WHO's nye anbefalinger	127
13.1	Kvælstofdioxid	127
13.2	Carbonmonoxid	129
13.3	Svovldioxid	129
13.4	Ozon	130
13.5	Partikler, PM _{2.5} og PM ₁₀	131
13.6	Sammenfatning	134
14.	Referencer	135
Bilag 1		143
	Detaljer om kalibrering af OSPM og validering af modelresultater	145

Sammenfatning

Rapporten præsenterer resultater for 2021 fra den nationale overvågning af luftkvalitet med særligt fokus på den helbredsskadelige effekt af luftforureningen. Overvågningsprogrammet dækker hele Danmark, men der er særligt fokus på forholdene i byerne, hvor luftforureningen er højest, og hvor der bor flest mennesker. DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi (DCE) ved Aarhus Universitet gennemfører overvågningen af luftkvalitet for Miljøministeriet i samarbejde med kommunerne i København, Odense, Aarhus og Aalborg.

Formålet med overvågningsprogrammet er, at:

- dokumentere status for luftkvaliteten og vurdere status i forhold til EU's grænse- og målværdier for luftkvaliteten,
- bestemme udviklingstendensen for luftkvaliteten for dermed at kunne vurdere effekten af de nationale og internationale tiltag der er gennemført for at reducere udledningerne,
- varsle befolkningen ved overskridelse af EU's varslingstærskler (i Danmark relevant for ozon), og
- opgøre helbredseffekterne og de økonomiske omkostninger som følge af luftforureningen i Danmark. Overvågningen af luftkvalitet baseres på en kombination af målinger og modelberegninger. Målingerne foretages ved ni målestationer placeret i de fire største danske byer, en forstadsmålestation i Hvidovre og fire baggrundsmålestationer uden for byerne. Modelberegninger af luftkvaliteten udføres ved brug af DCE's internationalt anerkendte luftkvalitetsmodeller.

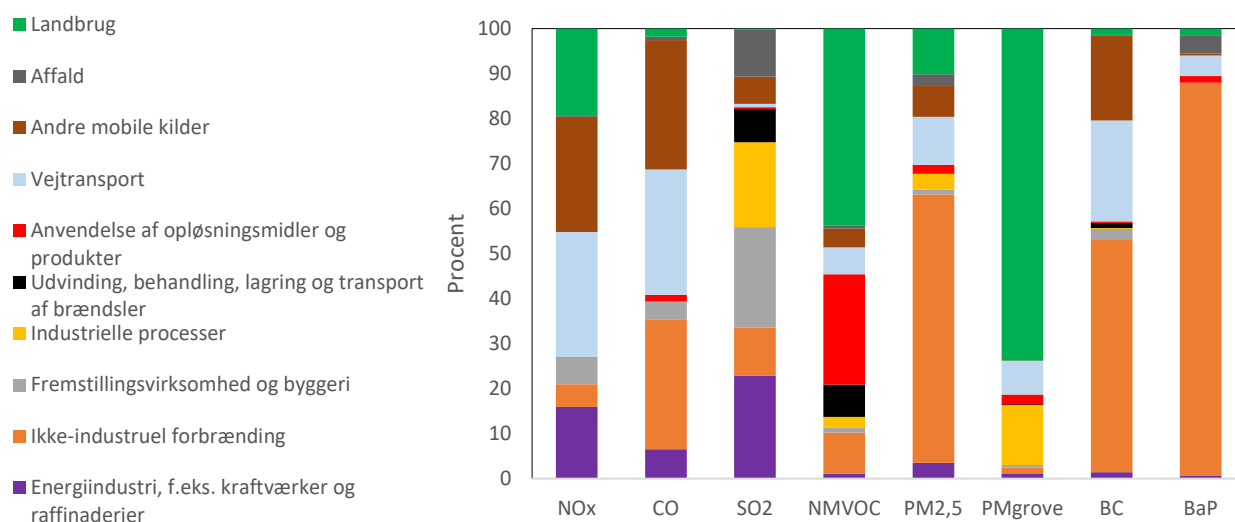
Målingerne udføres i overensstemmelse med EU's luftkvalitetsdirektiver. I henhold til disse og under hensyntagen til øvrige danske behov måles koncentrationer af kvælstofdioxid og kvælstofoxider (NO_2/NO_x), svovldioxid (SO_2), massen af partikler med diametre mindre end 10 og 2,5 mikrometer (hhv. PM_{10} og $\text{PM}_{2,5}$), partikelantal, benzen (C_6H_6), toluen (C_7H_8), carbonmonoxid (CO), ozon (O_3), elementært kulstof (EC), organisk kulstof (OC), udvalgte tungmetaller (f.eks. bly (Pb), arsen (As), cadmium (Cd), kviksølv (Hg), nikkel (Ni)) og polycykliske aromatiske kulbrinter (PAH) samt udvalgte flygtige organiske kulbrinter (VOC'er), der kan føre til dannelse af O_3 . Alle disse luftforureningskomponenter kan give anledning til negative helbredseffekter.

Opgørelse over udledninger af luftforurening

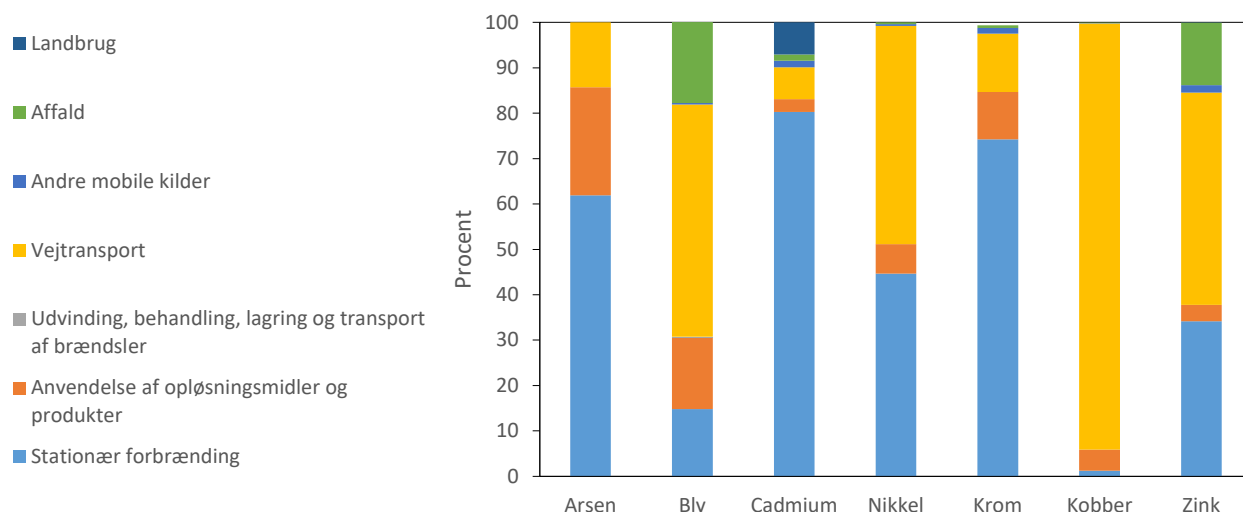
Rapporten giver en oversigt over udledning af luftforurening fra danske og europæiske kilder. Dels gives en status for de vigtigste kilders bidrag til udledningerne i 2020, som er de seneste opdaterede opgørelser. Dels præsenteres udviklingstendensen for udledningen af de forskellige luftforureningskomponenter. Viden om kilderne og udviklingstendensen for udledningerne giver en god baggrund for at forstå årsagerne til den geografiske fordeling af og udviklingstendenserne for luftforureningskomponenterne. Data om de danske udledninger er baseret på de nationale opgørelser over udledningerne, som udarbejdes af DCE for Miljøministeriet (Nielsen et al., 2022) og fra den fælleseuropæiske database over udledningerne fra medlemslandene i EU (CEIP, 2023).

Kilderne til udledningerne af luftforureningen varierer mellem de forskellige luftforureningskomponenter. Figur 1 og 2 viser bidraget til udledningerne opdelt i de hovedkategorier, som anvendes i forbindelse med den internationale indrapportering af udledningerne. For partiklerne inkluderer opgørelserne kun de partikler, der udledes direkte fra kilderne. De partikler, som dannes via kemiske reaktioner i luften, er derfor ikke dækket af opgørelserne.

For langt de fleste luftforureningskomponenter er der sket en væsentlig reduktion i udledninger siden 1990. Størst fald har der været for udledningerne af bly og svovldioxid, hvor udledningerne er reduceret med mere end 90%. Carbonmonoxid, arsen, nikkel og krom er reduceret med 70-86%. Kvælstofoxiderne og black carbon (BC) er reduceret med 65-70%, mens de fine partikler (PM_{2,5}), benz[a]pyren, flygtige organiske forbindelser (uden metan) og cadmium er reduceret med 45-60%. De grove partikler (partikler mellem 2,5 og 10 µm) og zink er kun reduceret ganske lidt, og for kobber er der sket en stigning på omkring 30% frem til 2019 efterfulgt af et fald på omkring 10% fra 2019 til 2020, hvor faldet hovedsageligt skyldes covid-19-restriktioner. Ændringerne i udledningerne afspejler de tiltag, der er implementeret for at reducere udledningerne i de seneste årtier, og at der gennem de seneste 30 år er sket ændringer i de aktiviteter, som forårsager udledningerne.



Figur 1. Udledning af en række vigtige luftforureningskomponenter fra danske kilder i 2020 opdelt i hovedkategorier (Nielsen et., 2022). Opdelingen i hovedkategorier følger standard for indrapportering til EU. Følgende luftforureningskomponenter indgår: kvælstofoxider (NO_x), carbonmonoxid (CO), svovldioxid (SO₂), flygtige organiske forbindelser uden metan (NMVOC), fine partikler (PM_{2,5} = partikler med diameter under 2,5 µm), grove partikler (PM_{grove} = partikler med diameter mellem 2,5 og 10 µm), black carbon (BC) og benz[a]pyren (BaP). Opgørelserne af udledningerne dækker kun de direkte udledte partikler og ikke de partikler, som dannes sekundært via de kemiske reaktioner i luften.



Figur 2. Udledning af udvalgte tungmetaller fra danske kilder i 2020 opdelt i hovedkategorier (Nielsen et., 2022). Opdelingen i hovedkategorier følger standard for indrapportering til EU.

Status og udvikling for luftkvalitet

Der er fastsat grænse- og målværdier for hovedparten af de målte stoffer i EU's luftkvalitetsdirektiver (EU, 2008; EU, 2004). En detaljeret beskrivelse af gældende mål- og grænseværdier og deres gennemførelse i dansk lov findes i en bekendtgørelse fra Miljø- og Fødevareministeriet (2017). Bekendtgørelsen er baseret på EU's 4. datterdirektiv (EU 2004) og EU's luftkvalitetsdirektiv fra 2008 (EU, 2008). Endvidere har WHO i september 2021 offentliggjort anbefalinger med en række grænser for luftkvaliteten for de mest helbredsskadelige luftforureningskomponenter (WHO, 2021a). EU's grænse- og målværdier er juridisk bindende, mens anbefalinger fra WHO kun er vejledende. I rapporten sammenlignes resultaterne fra 2021 med både EU's grænse- og målværdier og de nye retningslinjer fra WHO.

I 2021 blev grænseværdierne for kvælstofdioxid ikke overskredet. Koncentrationerne af kvælstofdioxid ved gademålestationerne er faldet betydeligt i de seneste år, og dermed ligger årsmiddelkoncentrationerne ved selv den mest forurenende gademålestation (H.C. Andersens Boulevard) omkring 30% under grænseværdien. Luftkoncentrationerne for kvælstofdioxid er faldet med omkring 50% på gademålestationerne siden 2005.

Luftkoncentrationerne for de fine partikler ($PM_{2.5}$) overholdt grænseværdien på $25 \mu g/m^3$ som årsmiddelværdi på alle målestationer. AEI-værdien (Average Exposure Indicator, som er defineret som middel af tre års gennemsnit af årsgennemsnittet af $PM_{2.5}$ i bybaggrund) er faldet med omkring 30% siden 2010. Dermed er det nationale reduktionsmål (15% reduktion siden 2010; EU, 2008) nået. Luftkoncentrationerne er faldet med 40-55% siden opstart af målingerne i henholdsvis 2007/2008.

Resultaterne fra en detaljeret analyse af den kemiske sammensætning af de fine partikler i landbaggrund ved Risø, bybaggrund ved H.C. Ørsted Institut og ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard viser, at selv ved den mest forurenede målestation på H.C. Andersens Boulevard kommer omkring 28% af forureningen med fine partikler fra kilder i København, mens omkring 72% af forureningen med fine partikler kommer fra udenlandske kilder og kilder i det øvrige Danmark.

PM₁₀ overholdt grænseværdien på 40 µg/m³ som årsmiddelværdi på alle målestationer. Ligeledes var der ingen målestationer i måleprogrammet, hvor det tilladte antal overskridelser af den daglige middelværdi for PM₁₀ (50 µg/m³ må ikke overskrides mere end 35 gange årligt) blev overskredet. PM₁₀ er faldet med 40 – 50% siden opstart af målingerne i 2001.

De tekniske problemer med måling af partikelantal blev løst i begyndelse af 2020, så derfor præsenterer rapporten for 2021 resultaterne fra måling af partikelantal i området 41-478/550 nm og 11-478/550 nm (mangler data i perioden fra 2016-2019). Antallet af partikler i området fra 11-480/550 nm var omkring 9.200 partikler per cm³ på gademålestationen H. C. Andersens Boulevard, hvilket er en faktor to højere end ved forstadsstationen i Hvidovre og omkring en faktor 3 højere end ved by- og landbaggrundsstationen ved henholdsvis H. C. Ørsted Instituttet og Risø. Siden 2002 er partikelantallet for begge fraktioner faldet med omkring 70% og 45% ved henholdsvis gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard og bybaggrundsmålestationen i København. I landbaggrund ved Risø er partikelantallet siden 2005 faldet med omkring 40% for fraktionen fra 11 - 478/550 nm og omkring 50% for partikelfraktionen fra 41 - 478/550 nm.

Luftkoncentrationerne af elementært kulstof (EC) ligger på omkring 0,6 µg/m³ ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard, mens der er væsentligt lavere koncentrationer i bybaggrund og landbaggrundsmålestationen (omkring 0,2-0,4 µg/m³). Der er sket et stort fald i luftkoncentrationerne af elementært kulstof. Størst fald ses ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard, hvor luftkoncentrationerne er faldet med omkring 75% siden 2010, hvilket korrelerer med faldet i udledningerne af black carbon.

Luftkoncentrationerne af svovldioxid og carbonmonoxid ligger lavt i forhold til grænseværdierne, og der er ingen overskridelser af disse. Siden 1990 er koncentrationerne ved gademålestationerne faldet med omkring 95% og 80% for henholdsvis svovldioxid og carbonmonoxid.

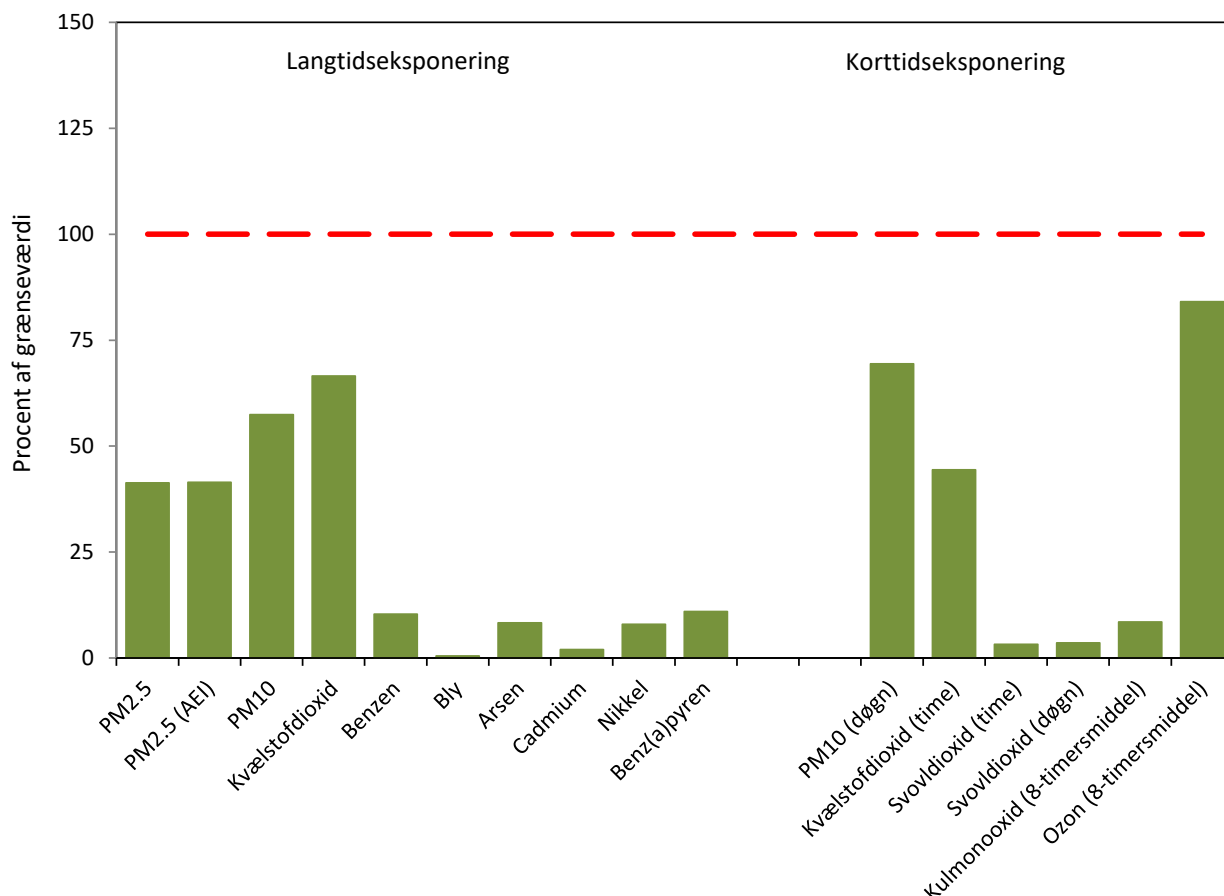
Ozonkoncentrationerne i 2021 var på niveau med tidligere år. Der er ikke fastsat egentlige grænseværdier for ozon, men kun "målværdier" og "langsigtede mål" (hensigtsværdier). Målværdien for ozon angiver, at 8-timersmiddelværdierne ikke må overskrides mere end 25 gange som gennemsnit for tre år. I 2021 var der ingen overskridelser af målværdien for beskyttelse af sundhed. Det planlagte langsigtede mål (8-timersmiddelværdi på 120 µg/m³) er endnu ikke trådt i kraft, og der er ikke taget beslutning om hvornår, dette skal ske. Såfremt det langsigtede mål havde været gældende, så ville det have været overskredet på alle målestationerne i 2021 inklusiv gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard. Tærsklen for information af befolkningen om høje ozonniveauer (timemiddel 180 µg/m³) blev ikke overskredet i 2021. Årsmiddelsonkoncentrationerne for ozon har ligget på stort set samme niveau den seneste årrække undtagen på gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard, hvor der måles en stigning grundet faldet i udledningerne af kvælstofoxider fra navnlig vejtrafik i byerne.

Middelkoncentrationerne for benz[a]pyren i 2021 var 0,11 ng/m³ og 0,25 ng/m³ på henholdsvis H. C. Andersens Boulevard og ved målestationen i Hvidovre. Ved målestationen i Hvidovre mangler data for sommerperioden pga. flytning, hvilket er årsag til, at middelværdien for 2021 ligger relativt højt set i forhold til tidligere år. Målværdien på 1 ng/m³ blev ikke overskredet i 2021. Luftkoncentrationerne på H.C. Andersens Boulevard og Hvidovre er faldet med omkring 55-65% siden 2008.

Målinger af 17 udvalgte flygtige organiske forbindelser i bybaggrund i København viser koncentrationsniveauer, som spænder fra 0,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ til 0,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2021. Benzen er den eneste flygtige organiske forbindelse, hvor der er fastlagt en grænseværdi. I 2021 lå luftkoncentrationerne på gademålestationerne i København på omkring 10% af grænseværdien. Disse flygtige organiske forbindelser bidrager til den kemiske dannelse af ozon på europæisk plan, og målingerne skal først og fremmest understøtte den generelle forståelse af ozondannelsen i Europa. I Danmark er størstedelen af de målte ozonniveauer hovedsageligt et resultat af langtransport af luftforurening fra centrale og sydlige dele af Europa. Der er sket et stort fald i luftkoncentrationerne for langt hovedparten af de menneskeskabte udledte flygtige organiske forbindelser. Luftkoncentrationerne for benzen er faldet med omkring 90% siden 1998.

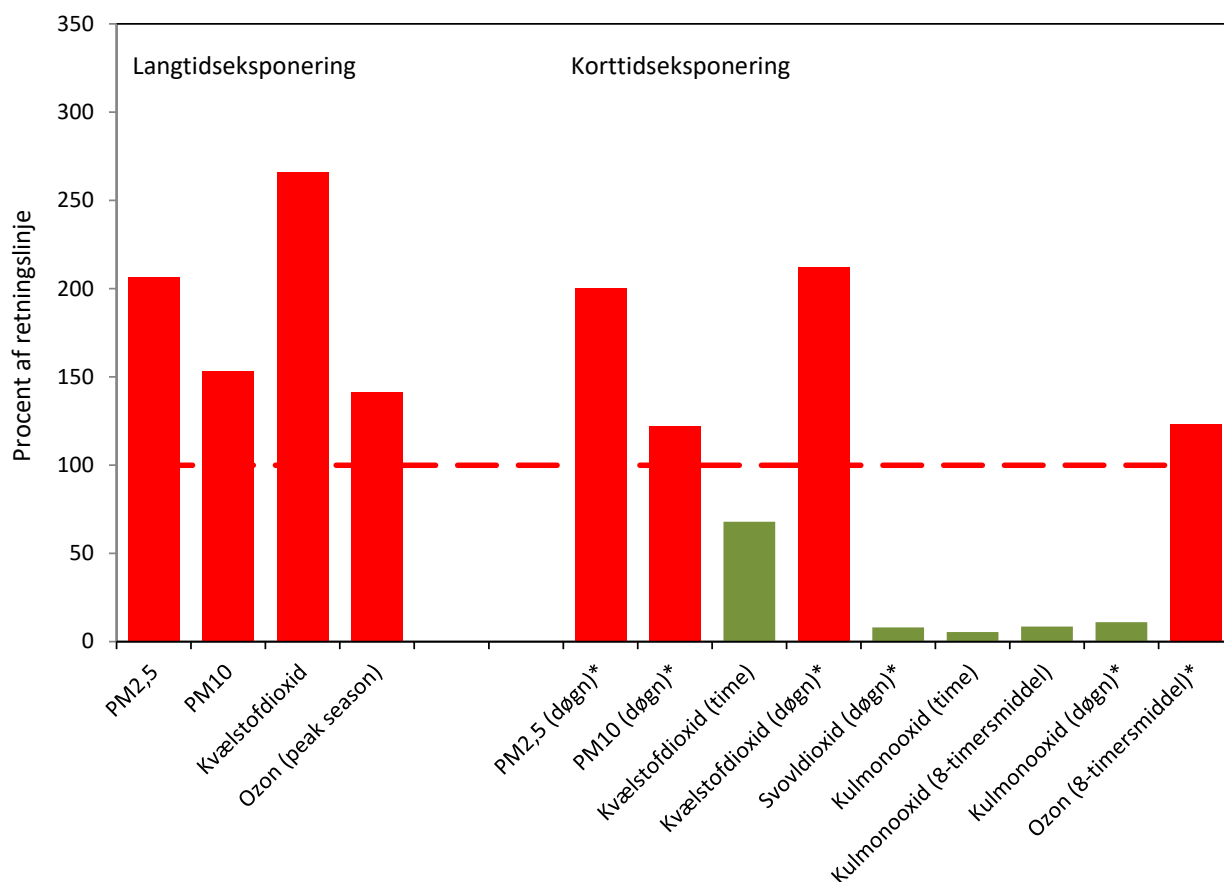
Målingerne af luftkoncentrationerne af tungmetaller og andre metaller viser, at der er sket et betydeligt fald i koncentrationerne for mange af stofferne siden 1982. Mest markant for bly, hvor koncentrationen er faldet med mere end 99% siden 1982 på H.C. Andersens Boulevard. Arsen er faldet med omkring 75% siden 1990, nikkel med omkring 75% siden 1982 og mangan er faldet med omkring 30% siden 1982. For kobber ses et mere komplekst billede med en tendens til en stigning i luftkoncentrationen frem til 2010 og herefter med en tendens til et mindre fald i de seneste år. For krom ses et nogenlunde jævnt niveau for mange af målestationerne med en tendens til et fald i de seneste år. Disse fald er i rimeligt god overensstemmelse med faldet i udledningerne.

Figur 3 giver en sammenfatning af status for luftkvalitet i relation til EU's grænse- og målværdier for ovennævnte luftforureningskomponenter. Som det fremgår af figuren, var der ingen overskridelser af grænse- og målværdierne. For korttidseksposering er grænseværdierne fastlagt på den måde, at der må være et vist antal overskridelser af en fastlagt grænse. Som eksempel gælder for PM_{10} , at døgnmiddelværdierne ikke må overskride 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mere end 35 gange per kalenderår. Procentsatsen vist i Figur 3 angiver døgnmiddeldkoncentrationen for den 36. højeste døgnmiddelværdi. For 2021 gælder således, at den 36. højeste døgnmiddeldkoncentration ligger på 67% af grænseværdien på 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, og dermed er der ikke overskridelse af grænseværdien for døgnmiddelværdien af PM_{10} . Figuren præsenterer resultaterne for de andre grænseværdier på tilsvarende vis, hvor der dog er fastlagt forskelligt antal tilladte overskridelser for de forskellige luftforureningskomponenter.



Figur 3. Oversigt over overholdelsen af EU's langsigtede og kortsigtede grænse- og målværdier for luftforureningskomponenterne omfattet af EU's luftkvalitetsdirektiver (EU 2004; EU, 2008). De langsigtede grænse- og målværdier er baseret på årsmiddelkoncentrationer, mens de kortsigtede grænse- og målværdier er baseret på time-, døgn- eller 8-timersmiddelværdier. Grænse- og målværdier er indekseret til 100% og luftkoncentrationerne er angivet i procent af grænse- og målværdier. Det er de højeste værdier målt i Danmark, som er angivet, og da alle koncentrationer ligger under 100%, er der ingen overskridelser af grænse- og målværdier i Danmark i 2021. PM_{2.5} (AEI) står for "Average Exposure Indicator", der er middelkoncentrationen for PM_{2.5} i bybaggrund i København, Aarhus og Aalborg.

I september 2021 offentliggjorde WHO opdaterede retningslinjer for luftforureningen for de mest helbredsskadelige luftforureningskomponenter (WHO, 2021a). Figur 4 giver et samlet overblik over, hvordan koncentrationsniveauerne for kvælstofdioxid, carbonmonoxid, svovldioxid, ozon og partikler (PM_{2.5} og PM₁₀) ligger ved de danske målestationer sammenholdt med de opdaterede retningslinjer fra WHO (2021a). WHO's retningslinjer for langtids-eksponering er overskredet for alle luftforureningskomponenter med størst overskridelse for PM_{2.5} og kvælstofdioxid. For korttidseksponering ses ligeledes overskridelse af WHO's retningslinjer for PM_{2.5}, PM₁₀, kvælstofdioxid og ozon. Til gengæld ligger niveauerne for svovldioxid og carbonmonoxid klart under de nye retningslinjer fra WHO. De mest helbredsskadelige luftforureningskomponenter (partikler, kvælstofdioxid og ozon) viser størst overskridelse af WHO's retningslinjer. Dette er med til at understrege, at der er behov for at reducere luftforureningen med disse komponenter yderligere, hvis man ønsker at opnå en reduktion af de helbredsskadelige effekter fra luftforureningen, som er omtalt i denne rapport (se nedenfor).



Figur 4. Oversigt over luftkvalitet i Danmark sammenholdt med WHO's nye retningslinjer vedrørende udsættelse for helbreds-skadelige luftforureningskomponenter (WHO, 2021a). Figuren er opdelt i retningslinjer vedrørende langtids- og korttidseksponering. Det er de højeste værdier målt ved de danske målestationer, som angives som procent af WHO's retningslinjer, som er indekseret til 100%. De langsigtede retningslinjer er baseret på årsmiddelkoncentrationer og for ozon på parameteren kaldet 'peak season', som beregnes ud fra gennemsnit af den maksimale daglige løbende 8-timersmiddelværdi beregnet for de seks efterfølgende måneder med de højeste værdier. De nye kortsigtede retningslinjer er fastlagt ud fra kalenderårets højeste time-middelværdi, 99%-fraktilen af døgnmiddel og den maksimale daglige 8-timers middelværdi. Hvis en parameter er mærket med stjerne, angiver det, at det er 99%-fraktilen som anvendes.

Endvidere viser modelberegningerne for 98 udvalgte gadestrækninger i København og 26 udvalgte gadestrækninger i Aalborg, at der ikke er overskridelse af EU-grænseværdierne i 2021, men WHO's retningslinjer for luftkvalitet fra 2021 overskrides for kvælstofdioxid, PM_{2,5} og PM₁₀ på samtlige gadestrækninger i modelberegningerne for 2021.

Helbredseffekter og økonomiske omkostninger af luftforureningen

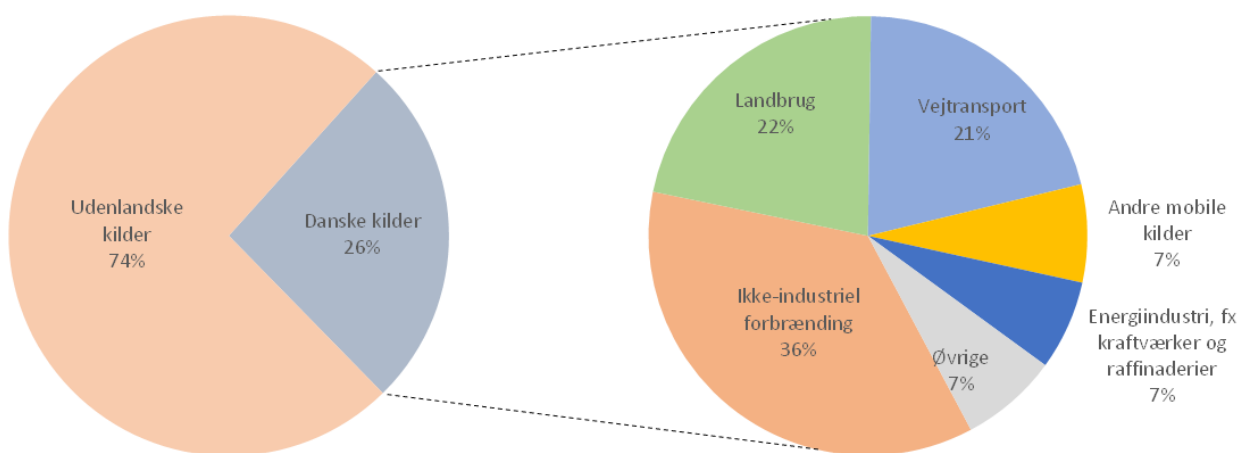
Modelberegningerne af helbredseffekterne viser, at luftforureningen i 2021 er skyld i omkring 3.900 for tidlige dødsfald og en lang række andre negative helbredseffekter. Antallet af for tidlige dødsfald er ca. det samme som angivet ved den seneste årsrapportering. Imidlertid er der en række ændringer i eksponerings-responsfunktioner og disses baggrundsdata samt tærskelværdier, der hver for sig giver hhv. højere eller lavere tal, men tilsammen giver disse ændringer ikke det store udslag. Beregningerne viser et fald i helbredseffekterne fra omkring 8.100 tilfælde af for tidlig død per år i 1990 til omkring 3.900 tilfælde per år i 2021. Dette svarer til en reduktion på omkring 52%.

De samlede omkostninger, som følge af luftforureningen i Danmark fra såvel udenlandske som danske kilder, er på omkring 63 milliarder kr. i 2021, hvilket er lidt over gennemsnittet for perioden 2019-2021. Den samlede helbredsrelaterede omkostning var omkring 139 milliarder kr. som middel over årene 1988-1990, og den er dermed faldet med omkring 55%.

I forbindelse med denne rapportering er der foretaget omfattende beregninger af kilderne til helbredseffekterne og de omkostninger relateret til luftforureningen i Danmark. Disse beregninger viser, at omkring 1.010 tilfælde af for tidlig død kan tilskrives udledninger fra danske kilder, hvilket svarer til omkring 26% af det samlede antal for tidlige dødsfald som følge af luftforureningen i Danmark. De resterende omkring 74% stammer fra udenlandske udledninger, herunder naturlige kilder og international skibstrafik. Tilsvarende fordeling mellem danske og udenlandske udledninger ses for omkostninger som følge af luftforureningen. Beregningerne viser også, at danske udledninger er ansvarlig for omkring 2.340 for tidlige dødsfald i udlandet.

Figur 5 og Tabel 1 viser de vigtigste kilders bidrag til antallet af for tidlige dødsfald i Danmark. De vigtigste danske kilder til for tidlige dødsfald er ikke-industriel forbrænding (navnlig boligopvarmning med brænde), som er ansvarlig for omkring 370 tilfælde svarende til omkring 36% af antal tilfælde af for tidlige dødsfald fra danske kilder. Ikke-industriel forbrænding udgør omkring 8 % af antal tilfælde af for tidlige dødsfald set i forhold til den samlede luftforurening fra danske, internationale og naturlige kilder. Landbrug og vejtransport er de næstvigtigste danske kilder.

Usikkerhederne er betydelige på beregningerne af helbredseffekterne og omkostninger fra luftforureningen. Førende internationale forskere på området har vurderet, at deres egne beregninger er behæftet med en usikkerhed på $\pm 50\%$ (Lelieveld et al., 2019). DCE vurderer, at usikkerhederne på beregningerne præsenteret i nærværende notat ligger på samme niveau.



Figur 5. Bidrag fra danske og udenlandske kilder til antal tilfælde af for tidlige dødsfald per år i Danmark (venstre) og de forskellige danske kilders bidrag til for tidlige dødsfald i Danmark (højre). For de danske kilder vises de fem vigtigste kilder, mens de resterende kilder er samlet under øvrige.

Tabel 1. Danske kilders andel af for tidlige dødsfald set i forhold til antallet af for tidlige dødsfald som følge af danske udledninger, samt danske og udenlandske kilders andel set i forhold til antallet af for tidlige dødsfald fra den samlede luftforurening i Danmark, som inkluderer de danske, udenlandske og naturlige kilder. Der er ved beregningerne ikke skelnet mellem naturlige kilder i Danmark og udlandet, og da langt størstedelen af bidraget fra naturlige kilder stammer fra kilder uden for Danmark, er bidraget fra naturlige kilder grupperet under bidrag fra udenlandske kilder.

Kategori	SNAP-kode	Andel fra danske kilder i forhold til det samlede danske bidrag %	Andel fra danske kilder i forhold til den samlede luftforurening %	Andel fra udenlandske kilder i forhold til den samlede luftforurening %
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	6,6	1,5	3,9
Ikke-industriel forbrænding	2	36	8,1	5,3
<i>Handel og service</i>	201	0,9	0,2	-
<i>Husholdninger</i>	202	32	7,2	-
<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	203	3,2	0,7	-
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	3,9	0,9	5,6
Industrielle processer	4	3,3	0,7	1,3
Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	5	0,5	0,1	0,4
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	2,0	0,4	0,4
Vejtransport	7	21	4,8	8,8
<i>Udstødning</i>	701-706	15	3,4	-
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	6,1	1,4	-
Andre mobile kilder	8	7,2	1,6	2,3
Affald	9	2,5	0,6	0,5
Landbrug	3b,d,f-i	22	4,8	13
International skibstransport	-	-	-	14
Naturlige kilder	-	-	-	22
Samlet		100	26	74

WHO's nye retningslinjer vedrørende helbredsskadelig luftforurening omfatter også en grundig gennemgang af den internationale forskning omkring sammenhængen mellem eksponering for en række luftforureningskomponenter og helbredsskadelige effekter (WHO, 2021a). Gennemgangen af de internationale forskningsresultater gør det klart, at der er større helbredsskadelige effekter af luftforureningen end hidtil dokumenteret, og at de helbredsskadelige effekter af luftforureningen ses ved eksponering for selv relativt lave koncentrationer af luftforureningen.

I nærværende beregninger er WHO's nye retningslinjer implementeret, hvilket har betydning for fordelingen af antallet af for tidlige dødsfald. Da data for middellevælderen samtidig er opdateret, og de nye retningslinjer fra WHO også indeholder en ny tærskelværdi for NO₂, har det imidlertid ikke den store betydning for selve værdien af for tidlige dødsfald.

Summary

This report presents results for 2021 from the Danish monitoring of air quality with focus on the health related effects of air pollution. The air quality monitoring program covers the entire Denmark. However, the monitoring program has special focus on cities, where air pollution and population density are highest. DCE – the Danish Center for Environment and Energy at Aarhus University carries out the monitoring program on behalf of the Danish Ministry of Environment in cooperation with the municipalities of Copenhagen, Odense, Aarhus and Aalborg.

The aim of the monitoring program is to:

- document the state of the air quality in relation to EU's air quality limit and target values,
- determine the long-term trends for the air quality in order to evaluate the impact of the Danish and international measures taken to reduce air pollution,
- warn the Danish public when EU's warning thresholds are exceeded. In Danish context this is only relevant for ozone, and
- determine the health effects and external costs of air pollution in Denmark and perform detailed model calculations of the emission sources leading to air quality related health effects and external costs (additionally financed by the Danish Ministry for the Environment).

The monitoring of air quality is based on an integration of measurements and model calculations. The measurements are carried out at nine monitoring stations in the four largest cities in Denmark, one suburban monitoring station in Hvidovre and four regional background monitoring stations placed on the countryside. The model calculations are carried out using DCE's suite of internationally recognised air quality models.

The monitoring program covers the most relevant air pollutants that have impact on human health and those that are covered by the EU air quality directives (EU, 2004; EU, 2008). The program includes measurements of sulphur dioxide (SO₂), nitrogen oxides (NO_x/NO₂), particles with diameters less than 10 and 2.5 micrometers respectively (PM₁₀ and PM_{2.5}), particle number, elementary carbon (EC), organic carbon (OC), benzene (C₆H₆), toluene (C₇H₈), carbon monoxide (CO), ozone (O₃), polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), a number of heavy metals including lead (Pb), arsenic (As), cadmium (Cd), mercury (Hg), nickel (Ni), and finally a number of volatile organic compounds (VOCs) that are precursors to formation of ozone.

Emission inventories

This report presents an overview of the emissions of air pollutants from Danish and European sources. This overview includes 2020 emissions, which is the most recent reporting year. An overview of the long-term trends of the emissions is likewise covered. The aim of this overview is to facilitate the interpretation of monitoring results, i.e. explaining the spatial variability and long-term trends of the different air pollutants.

Data on emissions from Danish sources are obtained from the official national emission inventories prepared by DCE for the Danish Ministry of Environment (Nielsen et al., 2021). Emission data from the remaining EU member states are obtained from the European emission database (EMEP) (CEIP, 2023).

The sources of emissions of air pollutants vary considerably among pollutants. Figure 1 and 2 present the contributions from the different main categories of emission sources for different air pollutants. The emission inventories only cover the directly emitted particles and not particles formed via chemical reactions in the atmosphere.

Since 1990, there have been significant reductions in the Danish emissions for most air pollutants. The largest reductions are for the emissions of lead and sulphur dioxide that have been reduced with about 90%. Carbon monoxide, arsenic, nickel and chromium emissions have been reduced with 70-86%. Nitrogen oxides and black carbon emissions have been reduced with 65-70%, while emissions of fine particles ($PM_{2.5}$), benzo[a]pyrene, non-methane volatile organic compounds and cadmium have been reduced with 45-50%. Emissions of larger particles (particles between 2.5 and 10 μm) and zinc have only been reduced slightly and for copper there has been an increase of about 30% in the emissions from 1990 to 2019 followed by a reduction of about 10% from 2019 to 2020 mainly due to covid 19 restrictions. The long-term trends reflect the measures that have been taken to reduce the various emissions as well as changes in the activities that are responsible for the emissions.

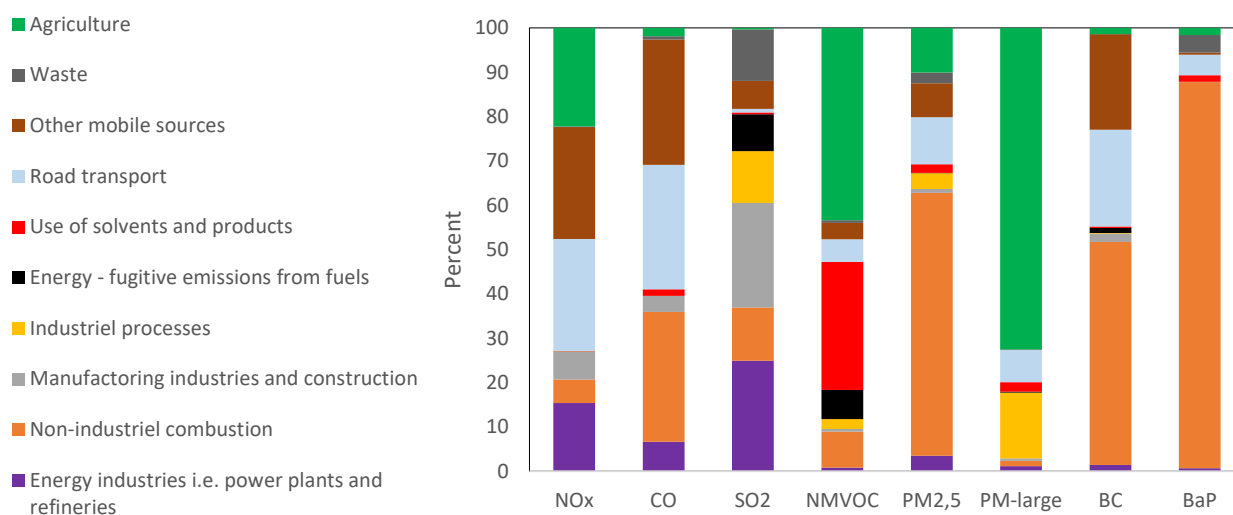


Figure 1. Emissions of selected air pollutants from Danish sources in 2020 grouped in main categories. (Nielsen et al., 2022). The grouping of the sources follows the standards for the international reporting of emissions. The following air pollutants are included: nitrogen oxides (NO_x), carbon monoxide (CO), sulphur dioxide (SO_2), non-methane volatile organic compounds (NMVOC), fine particulate ($PM_{2.5}$ = particles with diameter below 2.5 μm), large particles (PM-large = particles with diameter between 2.5 og 10 μm), black carbon (BC) and benzo[a]pyrene (BaP). The emission inventories only cover the directly emitted particles and not the particles formed via chemical reactions in the atmosphere.

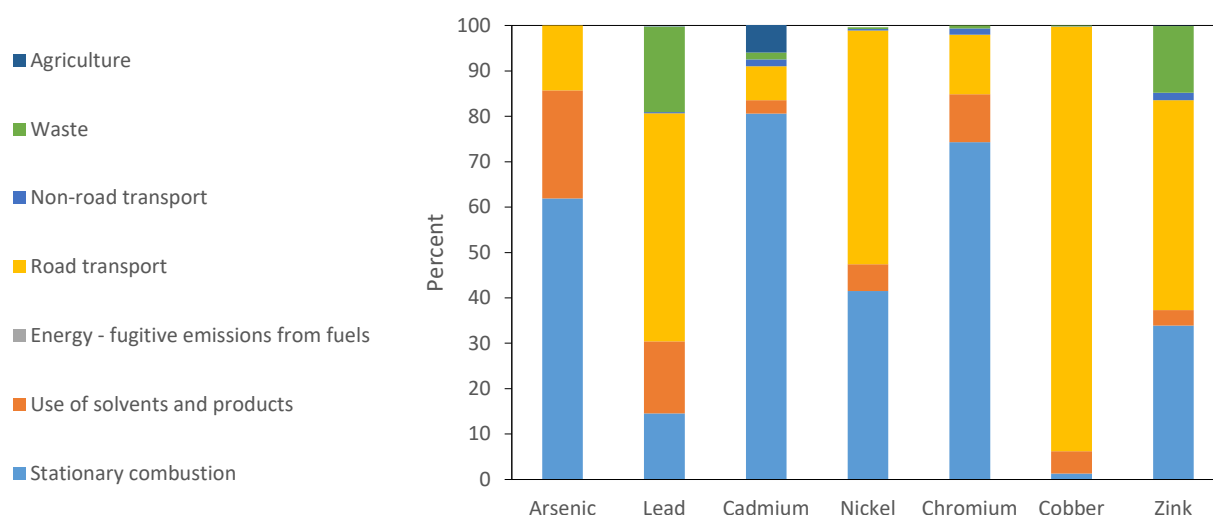


Figure 2. Emissions of selected heavy metals from Danish sources in 2020 grouped in main categories (Nielsen et al., 2022). The grouping of the sources follows the standards for the international reporting of emissions.

State and long-term trends of the air quality

The EU air quality directives establish air quality limit and target values for the most critical air pollutants (EU, 2008; EU, 2004). A detailed description of these can be found in the statutory order from the Ministry of Environment and Food Production (Miljø- og Fødevareministeriet, 2017). In addition, WHO published in September 2021 new air quality guidelines for the most critical air pollutants in relation to human health (WHO, 2021a). In this report the monitoring results are compared with EU limit and target values and the new WHO guidelines.

The permitted number of exceedances in a year of the diurnal limit value of $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM_{10} was not exceeded at any monitoring station in the monitoring network in 2021. Likewise, there were no exceedances of the annual limit values for PM_{10} ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and $\text{PM}_{2.5}$ ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Model calculations at 98 selected street segments in Copenhagen and 26 selected street segments in Aalborg in 2021 showed likewise no exceedances for annual average concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} . The average exposure indicator (AEI) determined as a running three-year mean of the average urban background concentration of $\text{PM}_{2.5}$ has decreased with about 30% since 2010 and hence the target (15% reduction) has been reached. The annual average concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} have decreased with 40-55% since 2007/2008 and 40-50% since 2001, respectively.

This report presents results from a detailed analysis of the chemical contents of $\text{PM}_{2.5}$ in the regional background at Risø/Roskilde, the urban background in Copenhagen and at the most polluted street monitoring station in Denmark (H.C. Andersens Boulevard, Copenhagen). This analysis shows that only about 28% of $\text{PM}_{2.5}$ at H.C. Andersens Boulevard originates from sources in Copenhagen, while about 72% of the concentration of $\text{PM}_{2.5}$ originates from sources in foreign countries and sources in the remaining part of Denmark.

Technical difficulties of recent years with the measurements of particle numbers have now been solved, and hence this report presents data from the particle range 41-478/550 nm as well as 11-478/550 nm for 2021. The number of particles in the range 11-478/550 nm was about 8,200 particles per cm^3 at the

street measurement station at H.C. Andersens Boulevard. This is about a factor of two higher than at the suburban measurement station in Hvidovre and about a factor of three higher than the urban and rural background measurement stations. Since 2002 the particle numbers for both size fractions have decreased with about 70% and 45% at the street measurement station on H.C. Andersens Boulevard and the urban background measurement station in Copenhagen, respectively. In the rural background at Risø, the particle number has decreased about 40% since 2005 for the fraction 11-478/55 nm and about 50% for the particle fraction 41-478/550 nm.

The limit values for nitrogen dioxide were not exceeded at any of the monitoring stations in Denmark. Model calculations at 98 selected street segments in Copenhagen and 26 selected street segments in Aalborg in 2021 showed likewise no exceedances of the long-term limit value based on the annual average concentration. The annual average concentrations of nitrogen dioxide at the street monitoring stations have been reduced with about 50% since 2005.

The concentrations of sulphur dioxide and carbon monoxide is very low compared to the limit values and there are no exceedance of these. Since 1990, the concentrations of sulphur dioxide and carbon monoxide have decreased with about 95% and 80%, respectively, at the street measurement station at H.C. Andersens Boulevard.

The annual average concentrations of elemental carbon (EC) were about 0.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at the street measurement station at H.C. Andersens Boulevard while the concentrations were considerably lower in the urban and rural background (0.2-0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). A large decrease in the concentrations has been measured for elemental carbon. The largest decrease has been measured at the street measurement station at H.C. Andersens Boulevard (about 75%) which is in agreement with the emission data.

In 2021, the annual average ozone concentrations were at the same level as in the previous years. No clear trend is observed for the average ozone concentration during the last years. The target value states that the maximum daily 8-hour mean ozone concentration must not exceed 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ more than 25 times annually on average for three years. The target value was not exceeded at any of the monitoring stations, but the long-term objective for this parameter (maximum daily 8-hour mean ozone concentration must not exceed 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) was exceeded at all Danish stations including the street measurement station on H.C. Andersens Boulevard. The target value entered into force in 2010 while the long-term objective has not entered into force and the date for this has not yet been decided. The information threshold of 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ was not exceeded during 2021.

Measurements of volatile organic compounds at the urban background monitoring station in Copenhagen showed concentration levels between 0.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for the selected 17 different compounds. Benzene is the only volatile organic compound with a settled air quality limit value (EU, 2008). In 2021 the annual average concentrations were about 10% of the limit value for the two street measurement stations in Copenhagen. Volatile organic compounds can act as precursors for the formation of ozone, and the aim of these measurements is to improve the general understanding of the ozone formation at a European level. The formation of ozone in Denmark is in general small due to moderate solar radiation. Ozone pollution in Denmark is mainly the result of long-range transport of pollutants from other European

countries south of Denmark. The annual average concentrations for most of the measured volatile organic compounds have been reduced significantly since 2010.

Measurements of the concentrations of particle bound polycyclic aromatic hydrocarbons were performed at H.C. Andersens Boulevard, Copenhagen and at the suburban monitoring station at Hvidovre. The average concentrations of benzo[a]pyrene in 2021 were 0.11 ng/m³ and 0.25 ng/m³ at H. C. Andersens Boulevard and Hvidovre, respectively. However, the monitoring station at Hvidovre lack data for the summer periode due to relocation of the monitoring station and this is the reason for the relative high average concentration during 2021. The target value for benzo[a]pyrene (1 ng/m³) was not exceeded in 2021. The annual average concentrations have been reduced with about 50-60% at H.C. Andersens Boulevard and Hvidovre since 2008 and 2013, respectively.

The levels of heavy metals have decreased for more than two decades, and the concentrations are now far below the limit values. The limit values for benzene and carbon monoxide are not exceeded either, and the levels have been decreasing for the last decades.

Figure 3 gives an overview of the air quality in Denmark in relation to the EU limit and target values. There are no exceedance of limit or target values at the Danish measurement stations. The limit values in relation to the short-term exposures have in the EU directive been defined based on a concentration limit that must not be exceeded more than a specified number of times during a calendar year. As an example, the 24-hour average concentration of PM₁₀ must not be exceeded more than 35 times within a calendar year. The percentage given for PM₁₀ (24-hour average) in Figure 3 corresponds to the 36th highest 24-hour average concentration. For 2021 the 36th highest concentration is 67% of the limit value and hence there is no exceedance of the limit value. Figure 3 presents data for the other short-term limit values in a similar way, although the number of allowed exceedances vary for the different limit values.

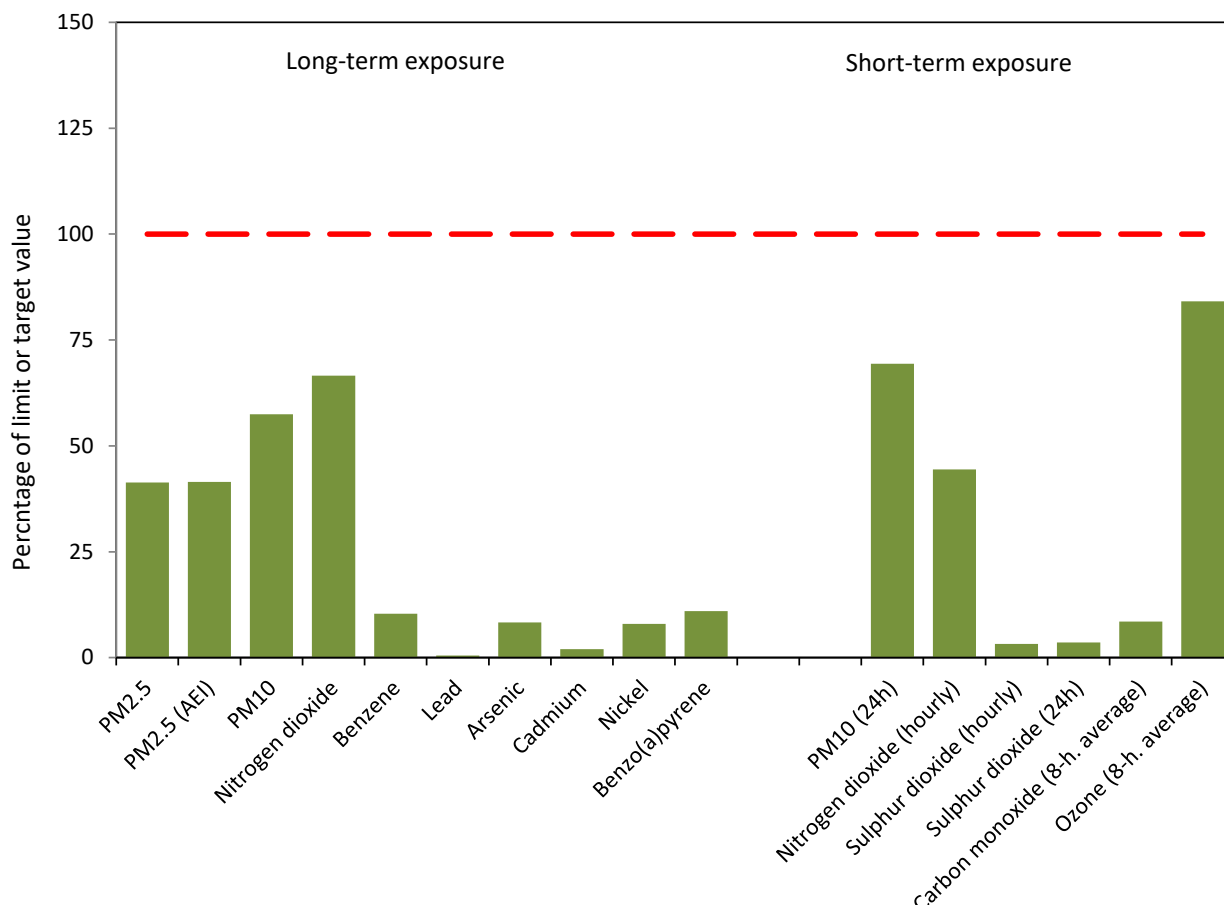


Figure 3. Overview of the Danish compliance with EU's short and long-term limit and target values (EU, 2004; EU, 2008). The long-term limit and target values are based on annual average concentrations while the short-term limit and target values are based on hourly, diurnal or 8-hourly averages. Limit and target values are set to 100% and the measured concentrations are given in percentage of the limit or target value. It is the highest concentrations measured at any monitoring stations that are used, and hence it is clear that there are no measured exceedances of the limit and target values in Denmark. PM_{2.5} (AEI) is the Average Exposure Indicator, calculated as the annual average of PM_{2.5} measured in the urban background in Copenhagen, Aarhus and Aalborg.

In September 2021, WHO published new air quality guidelines for the most critical air pollutants with respect to human health (WHO, 2021a). Figure 4 presents an overview with a comparison of the concentration levels for nitrogen dioxide, carbon monoxide, sulphur dioxide, ozone and particles (PM_{2.5} and PM₁₀) relative to the air quality guidelines adopted by WHO. The guidelines in relation to long-term exposure are exceeded for all air pollutants with the highest exceedances for nitrogen dioxide and PM_{2.5}. For short-term exposure there are exceedances for PM_{2.5}, PM₁₀, nitrogen dioxide and ozone. In contrast, the concentration levels are considerably lower than the guidelines for sulphur dioxide and carbon monoxide. It is the air pollutants with the highest impact on human health that show the highest exceedances of the air quality guidelines. This emphasizes the need to reduce the levels of these air pollutants to reduce the impact of air pollution on human health in Denmark (see next paragraph).

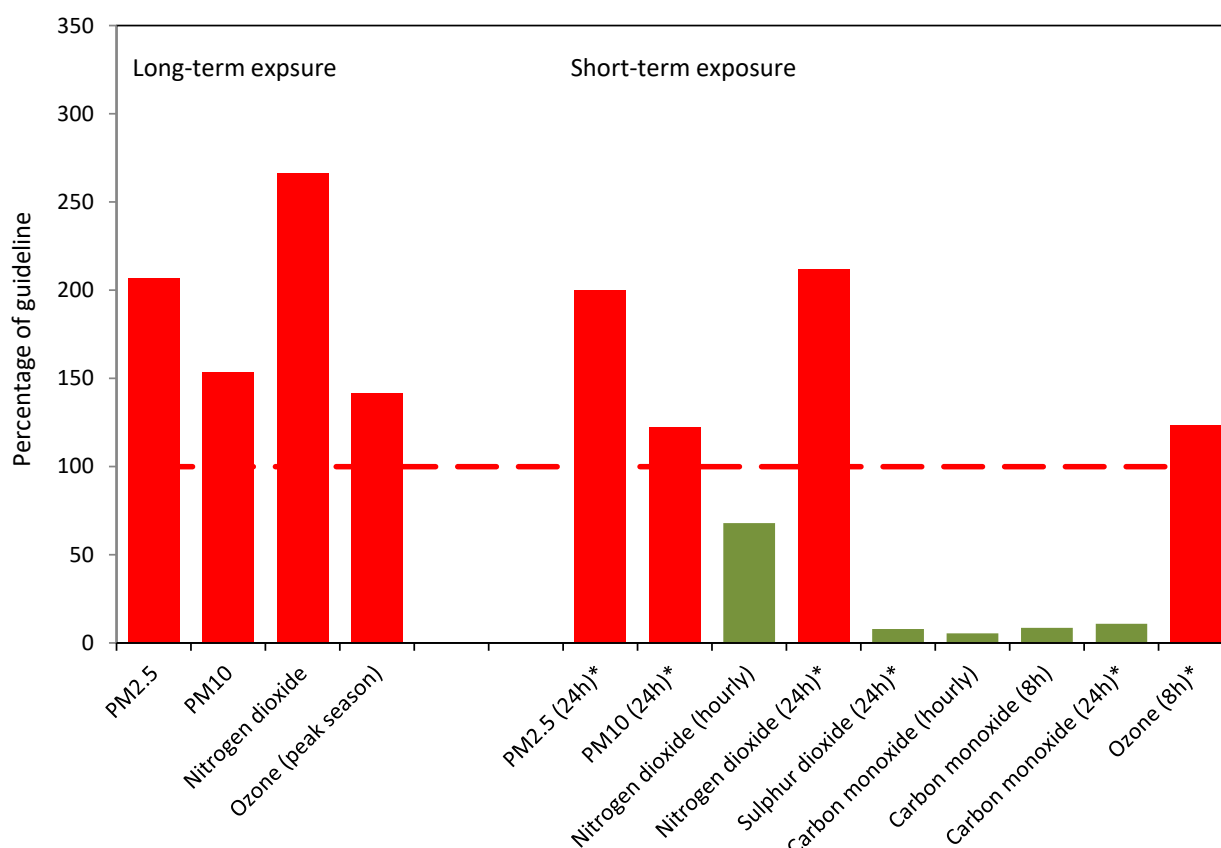


Figure 4. Overview on the exceedances of the new air quality guidelines from WHO (2021a) at the measurement stations in Denmark. The figure is divided according to guidelines regarding long-term and short-term exposure. It is the highest concentrations from the Danish measurement stations that are shown in percentage of the WHO guidelines that have been set to 100%. The long-term exposure guidelines are based on annual average and, for ozone, on a new parameter called Ozone peak season. This parameter is the average of the maximum daily 8-hour average concentration for the six consecutive months that gives the highest value. The short-term exposure guidelines are based on the maximum hourly average, 99% percentile of 24-hour averages and maximum daily 8-hour average concentration. The * indicate that the parameter is the 99% percentile.

Moreover, the model calculations for 98 selected street segments in Copenhagen and 26 selected street segments in Aalborg give no exceedance of the EU limit values, while the WHO guidelines from 2021 are exceeded for nitrogen dioxide, PM_{2.5} and PM₁₀ on all street segments in 2021.

Health effects and economic costs of air pollution in Denmark

Model calculations show that air pollution causes about 3,900 premature deaths in Denmark in 2021 and a large number of other negative health effects. This is on the same level as the reporting for 2019. However, there has been made a multitude of changes in the exposure response functions, background data to the functions and threshold values. Some of these changes leads to higher health impact and others to lower health impact but altogether they have not lead to large changes in the calculated health impact. Calculations of the entire data series back to 1990 show a decrease in the health effects due to air pollution. In 1990, about 8,100 premature deaths were due to air pollution in Denmark which has decreased with about 52% to around 3,900 premature deaths in 2021.

The total health related external costs of air pollution in Denmark from Danish and international sources was about 63 billion DKK in 2021, which was a just

above the average for 2019-2021. The total health related external costs of air pollution in Denmark have been calculated to 139 billion DKK as average for 1988-1990, and hence the cost has decreased with about 55% since 1990.

A detailed analysis of the air emission sources of the health effects and external costs in Denmark have been carried out in connection to this reporting. This analysis shows that about 1,010 premature deaths are due to emissions of air pollution in Denmark. This corresponds to about 26% of the total number of premature deaths. The remaining 74% are due to emissions outside Denmark. The same pattern is seen for the economic costs. The model calculations also show that Danish sources are responsible for about 2,340 premature deaths in foreign countries.

Figure 5 shows the contributions from the main air emission source categories to the number of premature deaths in Denmark. The most important Danish air emission source is non-industrial combustion (mainly household warming based on wood burning) responsible for about 370 premature deaths in Denmark corresponding to 36% of the total number of premature deaths due to Danish sources. The Danish non-industrial combustion accounts for about 8% of the total amount of premature deaths in Denmark due to both Danish, international and natural sources. Road transport and agriculture are the second and third most import sources.

The uncertainties on the calculations of health effects and external costs are significant. Leading international researchers have estimated that the uncertainties on their calculations are about $\pm 50\%$ (Lelieveld et al., 2019). DCE estimates that the uncertainties on the model calculations of health effects and external costs presented in this report are on the same level.

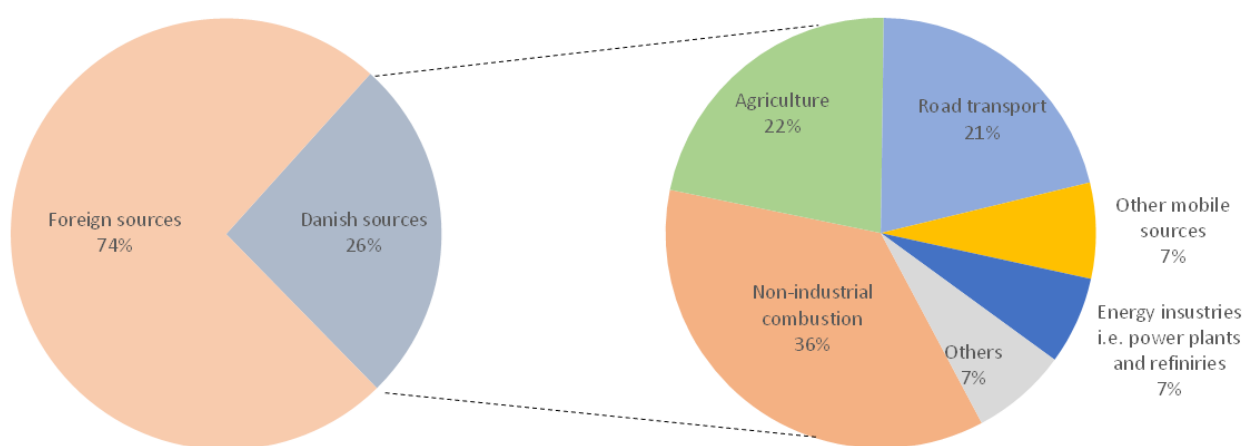


Figure 5. Contribution from Danish and foreign sources to the annual number of premature deaths in Denmark (left) and contributions from Danish sources to the annual number of premature deaths in Denmark (right). For the Danish sources, the five most important categories are shown while the remaining are grouped under “Others”.

Table 1. Relative contributions from Danish sources to the number of premature deaths in Denmark calculated relative to the number of premature deaths from Danish sources and the relative contributions from Danish and foreign sources relative to the number of premature deaths from the total air pollution in Denmark (including Danish, foreign and natural sources). The model calculations do not differentiate between Danish and foreign contributions to natural sources and the main part of the natural contributions comes from sources outside Denmark. Hence the natural sources have been set under foreign sources.

Categori	SNAP-code	Danish sources relative to the total contribution from Danish sources	Danish sources relative to the total air pollution in Denmark	Foreign sources relative to the total air pollution in Denmark
		%	%	%
Energy industries i.e. power plants and refineries	1	6,6	1,5	3,9
Non-industrial combustion	2	36	8,1	5,3
<i>Commercial and institutional</i>	201	0,9	0,2	-
<i>Households</i>	202	32	7,2	-
<i>Agriculture, forestry and aquaculture</i>	203	3,2	0,7	-
Manufacturing industries and construction	3	3,9	0,9	5,6
Industrial processes	4	3,3	0,7	1,3
Energy - fugitive emissions from fuels	5	0,5	0,1	0,4
Use of solvents and products	6	2,0	0,4	0,4
Road transport	7	21	4,8	8,8
<i>Exhaust</i>	701-706	15	3,4	-
<i>Non-exhaust</i>	707-708	6,1	1,4	-
Other mobile sources	8	7,2	1,6	2,3
Waste	9	2,5	0,6	0,5
Agriculture	3b,d,f-i	22	4,8	13
International shipping	-	-	-	14
Natural sources	-	-	-	22
Total		100	26	74

WHO's new guidelines (WHO, 2021a) also encompass a thorough review of the international research on the association between exposure to a number of air pollutants and effects on human health. The review documents that the health impacts are larger than previously known and that the impacts on human health are observed at lower concentration levels than previously documented.

The new guidelines from WHO (WHO, 2021a) have been implemented in the model calculations of the health impact carried out for this reporting and this has resulted in a change in the number of premature deaths originating from the different air pollutants. However, the overall number of premature deaths are approximately the same despite these changes. This is due to a parallel update of the average life expectancy and that the WHO guidelines recommends use of a new lower threshold for the health impact of nitrogen dioxide.

1. Indledning

Den danske overvågning af luftkvalitet er i dag samlet i Delprogram for luft under det Nationale Overvågningsprogram for Vandmiljø og Natur (NOVANA). Overvågningsprogrammet består af to dele med fokus på henholdsvis den helbredsskadelige effekt af luftforurening og på luftforureningens påvirkning af vandmiljø og natur. Resultaterne fra overvågningsprogrammet præsenteres årligt i form af to årsrapporter, hvor nærværende rapport præsenterer resultater med fokus på den helbredsskadelige effekt af luftforureningen. Den anden rapport (Atmosfærisk deposition 2021) har fokus på overvågning af tilførslen af luftforurening til vandmiljøet og naturen. Denne rapport om luftkvaliteten i 2021 og rapporten om den atmosfæriske deposition i 2021 offentliggøres i marts 2023 i sammenhæng med den øvrige rapportering under NOVANA.

DCE – Nationalt center for miljø og energi udfører overvågningen af luftkvalitet for Miljøstyrelsen, Miljøministeriet. Overvågning udføres i overensstemmelse med bekendtgørelse Nr. 1472 fra den 12. december 2017 fra Miljø- og fødevareministeriet (som nu er opdelt i to ministerier), som implementerer EU's to luftkvalitetsdirektiver (EU, 2004; EU, 2008) i dansk lovgivning.

DCE står for gennemførelse af målingerne og driften af overvågningsnetværket samt den nationale og internationale rapportering af data fra overvågningsprogrammet. Selve driften af overvågningsnetværket foretages i et samarbejde med Københavns, Aarhus, Aalborg og Odense Kommune.

Overvågning af luftkvalitet i relation til den helbredsskadelige effekt af luftforureningen har i dag følgende hovedformål:

- Dokumentation af status for luftkvaliteten i Danmark, herunder vurdering af overholdelse af EU's luftkvalitetskriterier angivet i de to luftkvalitetsdirektiver (EU, 2004; EU 2008). Luftkvalitetskriterierne er angivet i form af grænseværdier, målværdier, langsigtet målsætning og nationalt reduktionsmål. De danske luftkvalitetskriterier er identiske med EU's.
- Overvågning af udviklingstendensen for de forskellige luftforureningskomponenter. Dette er navnlig vigtigt, da det på denne baggrund er muligt at vurdere effekten af de miljøtiltag, som gennemføres på både nationalt og internationalt niveau.
- Information til befolkningen om luftkvalitet og varsling i tilfælde af overskridelse af EU-direktivernes varslingsgrænser (primært ozon).
- Dokumentation af de helbredsskadelige effekter af luftforureningen og de samfundsmæssige omkostninger som følge af de helbredsskadelige effekter.

Overvågningsprogrammet omfatter alle de vigtigste luftforureningskomponenter af relevans for vurdering af de helbredsskadelige effekter af luftforureningen. Dette drejer sig om følgende:

Gasser: Kvælstofdioxid og kvælstofoxiderne, carbonmonoxid, svovldioxid, flygtige organiske forbindelser og ozon.

Luftbårne partikler: Partikler med diameter under 2,5 µm og 10 µm (PM_{2,5} og PM₁₀) og partikelantal. Endvidere indgår elementært kulstof, organisk stof, metaller og tungmetaller, polycykliske aromatiske kulbrinter og benz[a]pyren samt de vigtigste uorganiske ioner.

Overvågningen gennemføres ved at udnytte den synergi, der opnås ved at integrere overvågningsmålinger med resultater fra modelberegninger med DCE's luftkvalitetsmodeller. Målingerne er essentielle for at dokumentere status ved målestationerne og måling af udviklingstendenserne samt viden om kildebidraget til de målte koncentrationer. Modelberegningerne har deres styrke i forhold til kortlægning af luftkvaliteten for større geografiske områder samt vurdering af kilderne til luftforureningen. Vurdering af helbredseffekterne og de heraf følgende økonomiske omkostninger er ligeledes baseret på modelberegninger.

I de følgende kapitler gennemgås resultaterne for hver luftforureningskomponent eller gruppe af luftforureningskomponenter. Hvert kapitel indledes med en kort status for udledningerne og udviklingstendenserne for disse. Herefter gennemgås status for luftkvaliteten og ændringerne af denne. Og endeligt afsluttes kapitlet med præsentation af modelresultater for udvalgte luftforureningskomponenter. Dog bliver der ikke lavet modelberegninger for alle luftforureningskomponenter.

Det næstsidste kapitel præsenterer resultaterne fra beregning af helbredseffekterne af luftforureningen og de økonomiske effekter af disse. Dette kapitel omfatter også resultater fra beregning af kilderne til helbredseffekterne.

Inden præsentationen af selve resultaterne gives en kort introduktion til opgørelserne af udledningerne, målenetværket, målemetoderne og modelberegningerne.

WHO offentliggjorde i september 2021 nye retningslinjer for luftkvaliteten for de mest sundhedsskadelige luftforureningskomponenter (kvælstofdioxid, carbonmonoxid, svovldioxid, ozon, PM_{2,5} og PM₁₀; WHO, 2021a). De nye retningslinjer fra WHO ligger væsentligt lavere end de hidtidige retningslinjer fra 2006. I det sidste kapitel sammenlignes luftkvaliteten i Danmark i 2021 med både de gamle og nye retningslinjer fra WHO.

I oktober 2022 offentliggjorde EU-kommissionen et forslag til en nyt luftkvalitetsdirektiv, som indeholder et forslag til en række ændringer i målsætningerne for luftkvaliteten i EU (EU, 2022). Der henvises til Ellermann (2022), hvor der er lavet en vurdering af luftkvaliteten set i relation til de nye forslag til grænseværdier, målsætninger, reduktionsforpligtelser m.m.

1.1 Opgørelse af udledninger

I forbindelse med konventionen om langtrækkende grænseoverskridende luftforurening samt EU's direktiv om nedbringelse af nationale emission (EU, 2016) har Danmark en forpligtelse til årligt at opgøre udledninger af en række luftforurenende stoffer. Opgørelserne følger internationalt vedtagne retningslinjer, herunder de tekniske retningslinjer i den fælleseuropæiske guidebog (EEA, 2019).

Udledningerne opgøres for alle menneskeskabte kilder og baserer sig på statistiske data for aktivitetsniveau, f.eks. energistatistikken og landbrugsstati-

stikken samt udledningsfaktorer, som baserer sig på national eller international forskning. Opgørelserne dokumenteres i en årlig rapport, som beskriver datagrundlag, metoder og resultater (Nielsen et al., 2022).

Udledningerne rapporteres for en række internationalt definerede sektorer. For at præsentere resultaterne overskueligt i denne rapport er de aggregeret til nogle få overordnede kategorier, se tabel 1.1. Bemærk at præsentationen af kilder til og udviklingstendens for udledningerne er baseret på data frem til og med 2020 for både udledninger for Danmark og EU-27, mens modelberegningerne (se Kapitel 1.4) er gennemført på basis af data for 2020 for danske kilder og 2019 for internationale kilder, herunder EU-27. Årsagen til denne forskel er, at udledningsdata fra internationale kilder ikke var tilgængeligt for 2020 på det tidspunkt, hvor modelberegningerne skulle gennemføres.

Tabel 1.1. Oversigt over inddelingen af udledningerne i hovedkategorier samt underkategorier for ikke-industriel forbrænding og vejtransport.

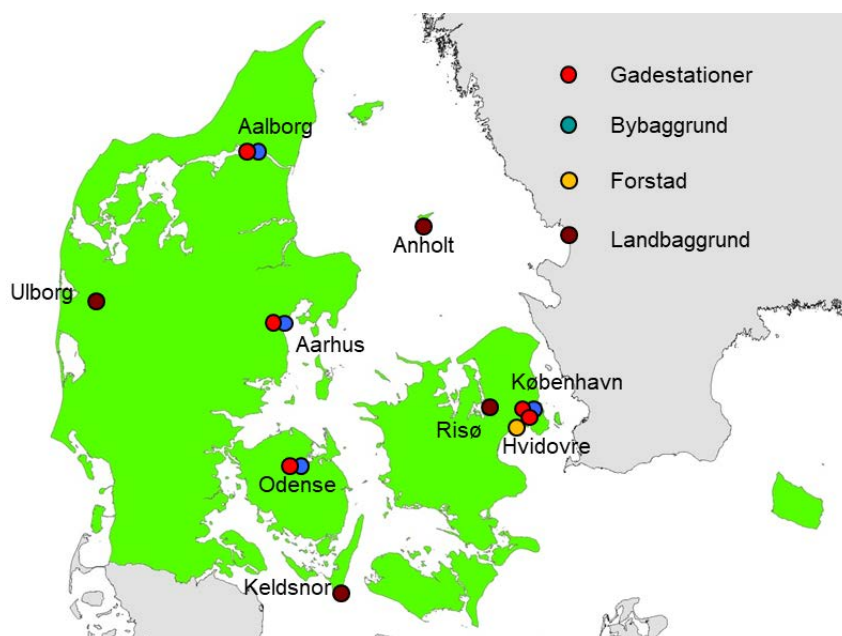
Kategori	Beskrivelsen
Energiindustri	Kraftvarmeverker, raffinaderier og energiforbrug til udvinding af olie og gas
Ikke-industriel forbrænding	Stationær forbrænding i nedenstående kategorier
- handel og service	f.eks. hospitaler, universiteter
- husholdninger	f.eks. brændeovne, oliefyr, naturgasfyr
- landbrug, skovbrug og akvakultur	f.eks. gartnerier, opvarmning af stalde
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	Stationær forbrænding i industrien
Industrielle processer	Procesrelaterede udledninger, som ikke stammer fra forbrænding
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	Fordampning i forbindelse med olie-/gasproduktion, tab af gas i forbindelse med transport og lagring, partikeludledning fra lagring af kul
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	Udledninger fra f.eks. anvendelse af rengøringsprodukter, maling, fyrværkeri og stearinlys
Vejtransport	Vejtransport knyttet til salget af brændstof til køretøjer i Danmark
- Udstødning	Udledninger fra køretøjernes udstødning
- Ikke-udstødning	Fordampning fra brændstoftanke, slid på dæk, bremses og vejbelægning
Andre mobile kilder	National søfart, fiskeri, fritidsfartøjer, luftfart (under 3000 fod), jernbane, maskiner og redskaber i industri, landbrug, skovbrug, handel og service samt husholdninger
Affald	Lossepladser, kompostering, spildevandshåndtering, ildebrande
Landbrug	Udledninger fra dyr, gødningshåndtering samt markarbejde

Der er udarbejdet tidsserier for udviklingen i udledningerne, som for alle luftforureningskomponenter går tilbage til 1990. Enkelte går længere tilbage, for eksempel tidsserien for svovldioxid, som går tilbage til 1980. De nationale opgørelser bliver årligt forbedret på basis af ny internationalt anerkendt viden. Opgørelserne for 2020 blev også forbedret på visse områder, hvilket er dokumenteret i Nielsen et al. (2022). I forbindelse med forbedringer af opgørelserne bliver hele tidserien genberegnet, således at der forligger konsistente tidsserier for udledningerne.

Baseret på opgørelserne foretages en geografisk fordeling af udledningerne som input til modelberegningerne. Dette foretages i SPREAD-modellen (Plejdstrup et al., 2021), der fordeler udledningerne på et 1 km x 1 km gitternet for det danske territorie.

1.2 Målenetværk

Det danske netværk af luftkvalitetsmålestationer er designet til at opfylde nationale og internationale krav til overvågning af luftkvalitet og afsætningen af luftforurening til vandmiljø og natur. I alt indgår 18 målestationer i det danske netværk, hvoraf de 14 anvendes i forbindelse med overvågningen i relation til helbredseffekterne af luftforureningen i 2021 (Figur 1.1). Det er kun disse 14, som vil blive omtalt i det følgende.



Figur 1.1. Målestationerne i Delprogram for luft under NOVANA. Det er kun de målestationer, hvor der måles luftforurening i relation til human sundhed, som vises på kortet.

Målestationerne er inddelt i fire kategorier:

Landbaggrundsmålestation: Målestation placeret uden for byerne i et område uden store lokale kilder.

Forstadsmålestation: Målestation placeret i typisk forstadsområde eller parcelhusområde, hvor der kan være et betydeligt bidrag fra brændefyring.

Bybaggrundsmålestation: Målestation placeret i byområder i en vis afstand fra lokale kilder, herunder vejtrafik. I Danmark er disse målestationer placeret på et højt tag eller i forbindelse med en park.

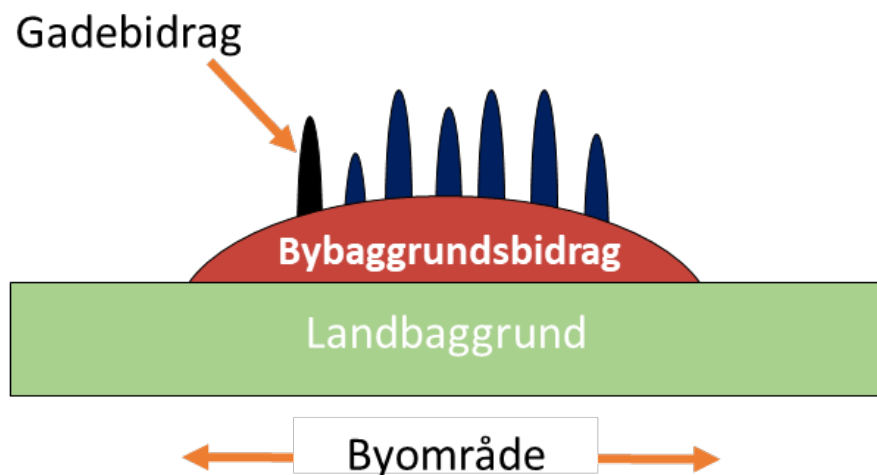
Gademålestation: Målestation placeret i stærkt trafikeret gade.

Denne organisering af målestationerne gør det muligt at få viden om kilderne til luftforureningen (Figur 1.2). Landbaggrundsmålestationerne giver viden om den langtransporterede luftforurening og angiver den andel af luftforureningen, som bliver transporteret med vinden ind til byerne.

Ved at se på forskellen mellem koncentrationer målt ved forstadsmålestation og i landbaggrunden kan der opnås viden om det ekstra bidrag til luftforurening, som stammer fra kilder i forstadsområder, for eksempel fra boligopvarmning fra brug af brændefyring.

Forskellen mellem koncentrationer ved bybaggrundsmålestation og landbaggrundsmålestation angiver det, der kaldes bybaggrundsbidraget, og forskellen mellem koncentrationer ved gademålestation og bybaggrundsmålestation angiver gadebidraget.

Denne måde at betragte de forskellige bidrag til luftforureningen på er ikke eksakt, og skal mest betragtes som en konceptuel model til forståelse af de forskellige kilders bidrag til luftforureningen på landet, i forstaden, i bybaggrunden og på gadeniveau.



Figur 1.2. Skitse af de forskellige bidrag til luftforureningen. Luftforureningen på en trafikeret gade består af bidraget fra landbaggrund plus bybaggrunds- og gadebidraget. Landbaggrund består for en stor del af langtransporteret luftforurening og betegnes ofte også som den regionale baggrund.

Målestationerne er meget forskellige i størrelse og antal målte parametre. Målestationen på H.C. Andersens Boulevard er den største målestation, hvor næsten alle parametre måles. Tilsvarende måles næsten alle parametre ved landbaggrundsmålestationen ved Risø. Denne tilgang er valgt for så vidt muligt at opnå et komplet billede af luftforureningen ved disse to nøglemålestationer. Lige så vigtigt har det været at sikre en god opfyldelse af kravene opstillet i EU's luftkvalitetsprogram og at sikre en god geografisk dækning af Danmark med placering af målestationer og fordelingen af målte parametre. Tabel 1.2 giver et samlet overblik over målingerne ved de 14 målestationer.

Tabel 1.2. Oversigt over de målte parametre ved de forskellige målestationer. Målingerne af elementært kulstof og partikelantal ved bybaggrundsmålestationen i København gennemføres via et særskilt projekt for Miljøsyrelsen.

Målestation	Kvælstofdioxid og kvælstofoxider	Carbonmonoxid	Svovldioxid	Flygtige organiske forbindelser	Benzen, toluen og xylener	Ozon	Fine partikler (PM _{2,5})	Fine+grove partikler (PM ₁₀)	Partikelantal	Elementært kulstof	Organisk kulstof	Metaller/tungmetaller	Polycykliske aromatiske kulbrinter/benz[a]pyren	Uorganiske ioner
<i>Gade</i>														
København, H.C.Andersens Boulevard	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	
København, Jagtvej	x				x		x	x						
Odense, Grønløkkevej	x	x						x						
Aarhus, Banegårdsgade	x	x					x	x					x	
Aalborg, Vesterbro	x	x	x				x							
<i>Bybaggrund</i>														
København, H.C. Ørsted Instituttet	x	x		x	x	x	x	x	x	x		x		
Odense, Rådhus	x					x								
Aarhus, Botanisk Have	x					x	x							
Aalborg, Østerbro	x					x	x							
<i>Forstad</i>														
Hvidovre	x						x		x	x	x		x	
<i>Landbaggrund</i>														
Risø	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x		x
Anholt	x		x									x		
Keldsnor	x		x			x		x						
Ulborg	x		x			x								
Samlet antal	14	6	6	1	3	8	9	7	4	4	3	5	2	1

1.3 Målemetoder

Målingerne af de forskellige luftforureningskomponenter foretages så vidt muligt med de referencemetoder, som er fastlagt i EU's luftkvalitetsdirektiver. Enkelte målinger udføres med alternative metoder, som dog er veldokumenterede og internationalt anerkendte. DCE er akkrediteret af DANAK i henhold til ISO 17025 (version 2017) til udførelse af hovedparten af målingerne. Tabel 1.3 giver en oversigt over de anvendte metoder.

Tabel 1.3. Oversigt over anvendte metoder.

Luftforureningskomponent	Metode
<i>Gasser</i>	
Kvælstofdioxid og kvælstofoxider	NO _x -monitor, kemiluminescens (online data)
Ozon	O ₃ -monitor, UV-absorption (online-data)
Carbonmonoxid	CO-monitor IR-absorption (online data)
Svovldioxid	SO ₂ -monitor, UV-fluorescens (online data) og filterpack-opsamler på landbaggrundsmålestationerne
Benzen, toluen og xylener	Passiv opsamling og analyse med GC-MS
Flygtige organiske forbindelser	Opsamling på pakkede rør og analyse med GC-MS**
<i>Partikler</i>	
Fine partikler (PM _{2,5})	Opsamling af PM _{2,5} på partikelfilter (low volume sampling) og gravimetrisk måling af partikelmasse
Fine+grove partikler (PM ₁₀)	Opsamling af PM ₁₀ på partikelfilter (low volume sampling) og gravimetrisk måling af partikelmasse
Partikelantal (11 nm - 478/550 nm)	Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)
Elementært kulstof	Opsamling af PM _{2,5} på partikelfilter (low volume sampling) og termooptisk analysemetode
Organisk kulstof	Opsamling af PM _{2,5} på partikelfilter (low volume sampling) og termooptisk analysemetode
Metaller og tungmetaller*	Opsamling på partikelfilter (low volume sampling, PM ₁₀) og ICPMS-analyse
Polycykliske aromatiske kulbrinter og benz[a]pyren	Opsamling af PM ₁₀ på partikelfilter (high volume sampling) og analyse med LC-MS
Uorganiske ioner	Opsamling af PM _{2,5} på partikelfilter (low volume sampling) og analyse med ionkromatografi

*Ved landbaggrundsmålestationer opsamles luftens totale suspendede partikelmængde (total suspended particulate), som dækker partikler med diameter op til 14-20 µm.

**Rørene er pakket med Carbopack X.

Ud over ovennævnte metoder anvendes ligeledes TEOM-instrumenter (Tapered-Element Oscillating Microbalance) til måling af partikelindholdet (PM_{2,5} og PM₁₀) med høj tidsopløsning (timemiddelværdier). Disse målinger anvendes til online information af befolkningen og indgår ikke ved vurdering af overskridelse af grænseværdierne, da målingerne har væsentlig større usikkerhed end målingerne udført ved hjælp af referencemetoden.

1.4 Modelberegninger

I overvågningsprogrammet suppleres de kontinuerte målinger af luftforureningen med modelberegninger af luftkvalitet for kvælstofdioxid og partikler (PM_{2,5} og PM₁₀) for en række udvalgte gadestrækninger i København og Aalborg. Disse modelberegninger foretages på lokalskala, hvor der tages hensyn til lokale forhold for den enkelte gadestrækning samtidig med at bidrag fra baggrundsluftforureningen inddrages. Der laves også modelberegninger for ozon på national skala (også betegnet regional skala). Målet med disse modelberegninger er at få en bedre geografisk dækning end det, der kan opnås alene

på basis af de 14 målestationer. Herved opnås en bedre vurdering af overholdelse af EU's grænse- og målværdier samt WHO's retningslinjer for kvælstofdioxid og partikler.

I denne rapport bliver der endvidere præsenteret resultater fra beregninger af kilderne til luftforureningen i Danmark. Disse beregninger udføres ved at "slukke" for udledningerne fra de enkelte kilder til udledninger i modellen. Ved at se på forskellen mellem modelresultaterne fra den normale modelberegning med alle kilder og modelberegning uden f.eks. dansk vejtransport, kan man beregne bidraget fra dansk vejtransport til den samlede luftforurening i Danmark.

Modelberegningerne bliver gennemført med en kæde af modeller, som trinvist giver en højere og højere geografisk opløsning af resultaterne, således at modelberegningerne spænder fra at dække hele den nordlige halvkugle og ned til den enkelte gadestrækning. I forbindelse med overvågningsprogrammet anvendes og præsenteres dog kun data fra national skala og ned til gadeskala, men bidraget fra kilder uden for Danmark er også inkluderet.

Modellerne er integreret i det samlede modelsystem DEHM/UBM/AirGIS (også kaldt "Thor" systemet), som er grundigt beskrevet i en række internationale publikationer og på DCE's hjemmesider (Brandt et al., 2000, 2001 og 2003; <http://www.au.dk/THOR>). Modelsystemet består af følgende delelementer:

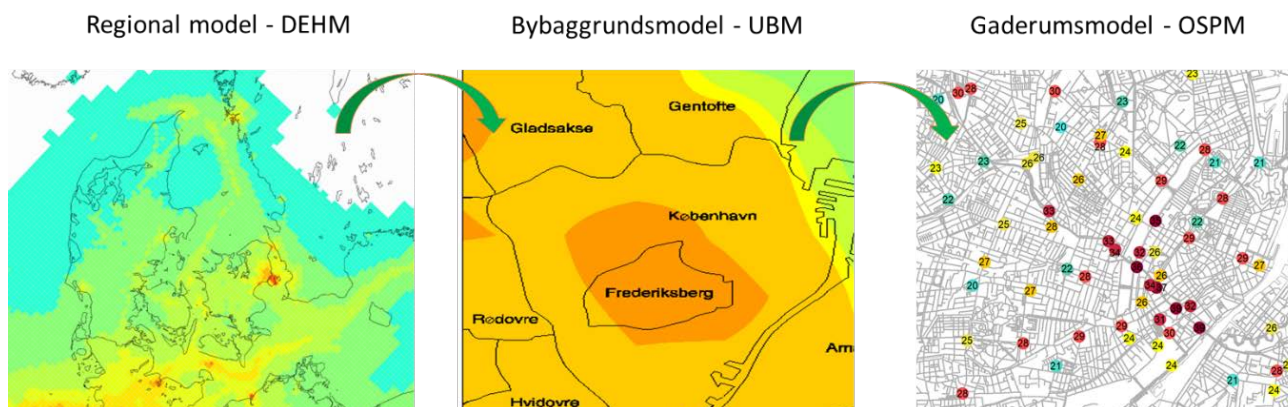
DEHM (Danish Eulerian Hemispheric Model): Denne model dækker hele den nordlige halvkugle og anvendes til beskrivelse af luftforureningen på stor geografisk skala. Modelberegningerne inkluderer beskrivelse af udledningerne, den atmosfæriske transport, de kemiske og fysiske processer i atmosfæren samt afsætning af luftforureningen på land- og vandoverflader. Modellen er opdelt i fire niveauer med stigende geografisk opløsning. For den nordlige halvkugle anvendes en geografisk opløsning med gitterceller på 150 km x 150 km (niveau 1), mens der for selve Danmark anvendes den højeste geografisk opløsning med gitterceller på 5,6 km x 5,6 km (niveau 4). Det er resultater for niveau 4, som anvendes i forbindelse med modelberegningerne præsenteret i denne rapport. Modellen dækker de nederste 15 km af atmosfæren og indeholder et omfattende kemisk modul til beregning af de relevante kemiske reaktioner i den lavere del af atmosfæren. Modellen er dokumenteret i Christensen (1997), Brandt et al. (2012) og på <http://au.dk/DEHM>.

UBM (Urban Background Model): Oprindeligt var denne model kun beregnet til at beskrive luftforureningen i baggrundsområder i byer, men siden er modellen blevet udvidet til at dække hele Danmark. Modellen gør det muligt at opnå en endnu bedre geografisk opløsning end med DEHM. UBM har en geografisk opløsning på 1 km x 1 km, som giver en god beskrivelse af luftforureningen i både by- og landområder. Modellen beskriver spredningen af luftforureningen fra lokale kilder (indenfor 30 km's radius) og indeholder en beskrivelse af de kemiske reaktioner, som det er nødvendigt at inkludere på denne skala. Resultater fra DEHM indgår som input til UBM. UBM er i de senere år blevet væsentlig forbedret i forhold til beskrivelse af de fysiske processer og håndtering af udledningerne (areal- og punktkilder), således at modellen i dag giver væsentligt mere realistiske resultater i sammenligning med målinger. Modellen er dokumenteret i en række artikler (Brandt et al. 2001; 2003; Berkowicz 2000b; Frohn et al., 2022), og på <http://au.dk/UBM>.

OSPM® (Operational Street Pollution Model): Som sidste led i modelkæden beregner OSPM® luftkvaliteten i 2 meters højde ved husfacaderne for udvalgte gadestrækninger (www.au.dk/OSPM). OSPM beskriver simple kemiske reaktioner, som er relevante i gaderummet, indflydelsen af de omgivende bygninger på spredningen af luftforurening, samt effekten af den atmosfæriske og den trafikskabte turbulens. Modellen baseres på detaljerede trafikinformationer om trafikintensitet, køretøjs sammensætning, rejsehastighed og detaljerede udledningsfaktorer fra trafikudledningsmodellen COPERT 5 (EEA, 2019). Resultater fra UBM indgår som input til OSPM. Modellen er dokumenteret i Berkowicz (2000a) og Ketzel et al. (2012).

AirGIS: Denne del af modelkæden anvendes til at håndtere de mange input-data til beregningerne med OSPM. Det drejer sig om trafikmængder, køretøjs sammensætning og rejsehastigheder samt gadegeometrien for de udvalgte gader. Gadegeometrien bliver genereret med AirGIS-modellen, som benytter en GIS-vejdatabase sammen med trafikdata, GIS-bygningsomrids med bygningshøjder samt adressepunkter (Jensen et al., 2001; 2017; Khan et al., 2019; <http://au.dk/AirGIS>).

Modellsystemet bliver ligeledes anvendt til at beregne koncentrationer af luftforurening på samtlige 2,5 millioner adresser i Danmark. Disse modelberegninger indgår også i Delprogram for luft under NOVANA. Der er foretaget beregninger for 2012 og 2019. Begge datasæt er offentligt tilgængeligt på et online kort (luftenpaadinvej.au.dk) Modellsystemet er dokumenteret i Jensen et al. (2017; 2021).



Figur 1.3. Illustration af koblingen mellem modellerne. Den regionale model (DEHM) dækker hele den nordlige halvkugle. For området omkring Danmark udføres beregningerne for et net af gitterceller med størrelse på 5,6 km x 5,6 km. Data fra DEHM overføres til bybaggrundsmodellen (UBM), som dækker Danmark med et net af gitterceller på 1 km x 1 km. Data fra UBM overføres til gaderumsmodellen (OSPM), hvor der udføres modelberegninger helt ned til lokalskala for de enkelte gadestrækninger. Figuren til højre viser et udsnit af de 98 beregnede gadestrækninger i København.

Alle modellerne kræver en række input-data, hvoraf de vigtigste er følgende:

Meteorologiske datasæt: For at kunne simulere de meteorologiske forhold med modellerne kræves omfattende meteorologiske datasæt. Disse datasæt bliver genereret med den meteorologiske model WRF (Weather Research and Forecasting Model) opsat for de samme områder som DEHM-modellen. WRF er udviklet af National Center for Atmospheric Research, USA (NCAR) (Se Skamarock et al. (2008) for detaljer). WRF version 4.1 benyttes. De nødvendige globale meteorologiske data, der bruges som input til WRF, er baseret på ERA5 re-analysedata med en geografisk opløsning på $0,2^\circ \times 0,2^\circ$.

Udledninger: Data om udledningerne baseres hovedsageligt på den danske nationale emissionsopgørelse for 2020 fra DCE (<https://envs.au.dk/en/research-areas/air-pollution-emissions-and-effects/air-emissions/>; Nielsen et al., 2021) og internationale emissionsopgørelser for 2019 fra EMEP (www.emep.int). Disse data er de mest opdaterede tilgængelige emissionsdata. For Danmark er emissionerne geografisk fordelt ud fra forskellige geografiske fordelingsnøgler med SPREAD-modellen 3.0 (Plejdrup et al., 2021). Udledningsmodulet i OSPM er baseret på COPERT 5-emissionsmodel.

De omfattende covid-19-restriktioner i Europa har medført en betydelig ekstraordinær reduktion af udledningerne af luftforurening i 2020 og 2021. For bedst muligt at tage hensyn til dette, er der foretaget en korrektion af udledningerne for 2020. Korrektionerne af EMEP's emissioner er baseret på de ændringer af udledninger fra trafik og industri for månederne marts-maj, som er beskrevet i Barre et al. (2021). De danske emissioner på årsbasis for 2020 er korrigeret og de korrigeres derfor ikke yderligere, men pga. covid-19-restriktioner er den tidslige fordeling af emissioner for trafik og industri ændret baseret på trafikinformationer fra vejdirektoratet for 2020 og 2021 samt de i Barre et al. (2021) beskrevet ændringer af danske industriemissioner.

Udledningerne for skibe er ligeledes ændret i forhold til tidligere modelberegninger. Ved modelberegningerne præsenteret i årsrapportering 2020 baseres udledningerne på det globale datasæt fra det Finske Meteorologisk Institut, som baserer opgørelserne på STEAM-modellen (se Johansson et al., 2017) og <https://permalink.aeris-data.fr/CAMS-GLOB-SHIP>). Udledningerne estimeres ved brug af globale data med høj geografisk og tidslig opløsning fra Automatic Identification System (AIS), som gør det muligt at estimere udledningerne fra de individuelle skibe. Datasættet bruger AIS-information for årene 2014-2020 og tager hensyn til ændringer i bl.a. svovlindhold i skibsbrændstof. Før 2014 er skibsemissionerne fastlagt på basis af ekstrapolering bagud i tid baseret på informationer om ændringer i flådestørrelse, energiforbrug, skibsstørrelser m.m. Den rummelige opløsning er også her på $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ svarende i det danske område til ca. 7 km x 11 km (hhv Ø-V og N-S) og den tidslige opløsning er på månedsbasis. Derudover bliver den rumlige fordeling genfordelt for havområderne omkring Danmark ved brug af et specielt STEAM-udledningsdatasæt for 2016 med høj rummelig opløsning på 1 km x 1 km, hvilket hovedsageligt flytter eventuelle skibseudledninger over land til havområder og opkoncentrerer udledningerne for færge- og skibsruter. Fordelen med det nye datasæt er, at man tager hensyn til variationen af skibsaktiviteterne imellem de enkelte år og de enkelte måneder, hvilket især har haft betydning i 2020 på grund af covid-19-restriktionerne. Skibsemissioner for 2020 blev brugt for modelberegningerne for 2021, da der ikke var nye skibsemissioner for 2021 tilgængeligt.

Trafikdata: Modelberegningerne med OSPM kræver detaljerede data om trafikken på den enkelte gadestrækning (trafikmængde, hastighed, køretøjssammensætning m.m.). Hvert år opdateres trafikdata på basis af de nyeste data fra Københavns Kommune og Aalborg Kommune vedrørende årsdøgntrafikken (ÅDT) og køretøjssammensætning (i kategorierne: personbiler, varebiler, lastbiler <32t, lastbiler >32t, busser). Trafikdata er så vidt muligt baseret på automatiske eller manuelle trafiktællinger på den enkelte gadestrækning. Oplysninger om rejsehastigheder på strækningerne er fra Vejdirektoratets datasæt SpeedMap, som er baseret på GPS-målinger af køretøjer.

Covid-19-restriktioner påvirkede til en vis grad trafikken i 2021 baseret på oplysninger fra Vejdirektoratet. Fra et samlet niveau på ca. 30 % under 2019 ved

årsskiftet mellem 2020 og 2021 steg trafikken gradvist i løbet af 2021, og lå efter sommerferien atter på niveau med eller lidt over trafikken i 2019. Det var personbiler, som blev påvirket mest blandt de forskellige køretøjsgrupper. Samlet set var trafikken knap 7 % lavere end før covid-19. Disse forudsætninger om lavere trafikniveau og anderledes variation over året er der taget hensyn til ved modelberegningerne for de udvalgte gader i København og Aalborg.

De anvendte modeller er som nævnt ovenfor valideret og dokumenteret i en række internationale videnskabelige publikationer. Modellerne har høj international standard, hvilket blandt andet kan ses ved, at DEHM er en del af det europæiske samarbejde Copernicus Atmospheric Monitoring Service (CAMS), hvor kun de bedste europæiske modeller indgår. Dette samarbejde leverer kvalitetskontrollerede operationelle luftkvalitetsprognoser for Europa (<https://atmosphere.copernicus.eu/>) på daglig basis.

Kvaliteten af resultaterne fra modelberegningerne vurderes løbende ved sammenligning mellem model- og måleresultater (Bilag 1). På basis af denne sammenligning vurderes også behovet for en eventuel justering af modelresultaterne, således at der opnås forbedret overensstemmelse mellem modelresultater og målinger. For 2021 er der ikke foretaget justering af resultaterne for beregning af årsmiddelværdier for kvælstofdioxid. Til gengæld er der gennemført en justering for partikelforureningen ($PM_{2,5}$ og PM_{10}), hvilket hænger sammen med, at det på nuværende tidspunkt ikke er muligt at inkludere alle partikulære luftforureningskomponenter i modelberegningerne.

Bilag 1 beskriver kalibrering, justering og dokumentation af modelberegningernes kvalitet.

1.5 Helbredseffekter og økonomiske omkostninger som følge af luftforureningen

Modelberegninger af helbredseffekter og omkostninger ved luftforurening har været en vigtig del af overvågningsprogrammet siden 2016. Disse beregninger foretages med EVA-modelsystemet (Economic Valuation of Air Pollution), som baseres på den såkaldte Impact-pathway metode ("påvirkningsvejens metode"; Figur 1.4), hvor nedenstående trinvis beregninger gennemføres.

Detaljerede informationer om udledninger anvendes til beregning af luftkoncentrationerne. Disse beregninger gennemføres med de to modeller DEHM og UBM, som er beskrevet i afsnit 1.4.

De beregnede luftkoncentrationer kombineres med befolkningsdata, så befolkningens eksponering for luftforureningen kan opgøres. Befolkningsdata for Danmark er opdateret og baseres nu på data fra CPR-registret udtrukket i marts, 2022. Oplysninger om aldersfordelingen indgår også (baseret på udtræk fra maj, 2022).

Herefter benyttes eksponerings-responsfunktioner til at beregne helbredseffekterne af luftforureningen. Der anvendes en række eksponerings-responsfunktioner, som hver for sig beskriver sammenhængen mellem de enkelte helbredseffekter og eksponeringen for de forskellige luftforureningskomponenter. Modelsystemet baseres på internationalt anerkendte eksponerings-responsfunktioner fremkommet i regi af WHO, og opdateres løbende.

Endeligt beregnes de samfundsmæssige omkostninger af luftforureningen ud fra en økonomisk værdisætning af de forskellige helbredseffekter, som er inkluderet i EVA-modellen (Andersen et al., 2019). Dette inkluderer bl.a. en økonomisk værdisætning af statistisk liv. Denne værdisætning er baseret på et studie udarbejdet for Det Økonomiske Råd (DØRS, 2016) og følger i øvrigt principperne i Finansministeriet (2017).

I 2021 offentliggjorde WHO nye anbefalinger til grænseværdier (se kapitel 13) vedrørende helbredsskadelig luftforurening (WHO, 2021a). Dette arbejde er baseret på en omfattende gennemgang af videnskabelige studier af sammenhængen mellem luftforurening og helbredseffekter, udført af en forskergruppe udpeget af WHO. Funderet i dette detaljerede arbejde er EVA-systemet blevet opdateret, så de anvendte eksponering-respons-funktioner, som før var baseret på WHO's anbefalinger fra 2013 (WHO, 2013), nu er baseret på de nyeste resultater (WHO, 2021a). De væsentligste ændringer knytter sig til estimatet for mortalitet fra langtidseksponering af PM_{2,5} og lang- og korttidseksponering af NO₂. For PM_{2,5} har mange studier peget på, at helbredsrisikoen er større end tidligere antaget. Den relative risiko for at dø for tidligt som følge af langtidseksponering for partikler vurderes nu at være 8% per 10 µg/m³ stigning i PM_{2,5} (mod tidligere 6,2%).

For langtidseksponering af NO₂ lød den tidligere WHO-anbefaling på at bruge en tærskelværdi for luftkoncentrationerne, hvorunder der ikke vurderes at være helbredseffekter af NO₂. Det blev anbefalet, at anvende en tærskelværdi på 20 µg/m³ i modelberegninger af helbredseffekter, mens det nu vurderes, at en tærskelværdi på 10 µg/m³ er mere korrekt. Endvidere er risikoen ved NO₂-langtidseksponering justeret ned fra ca 5% til 2% per 10 µg/m³ stigning.

For helbredseffekter relateret til korttidseksponering for NO₂ anvendes nu en døgnmiddelværdi, mod den maximale timekoncentration i løbet af døgnet, der blev anvendt før. Yderligere indikerer gennemgangen af de nyeste studier, at risikoen har været underestimeret, og det anbefales at ændre risikoen fra 0,27% til 0,71% per 10 µg/m³ stigning i NO₂. Også her anbefales en tærskelværdi på 10 µg/m³ mod tidligere 0.

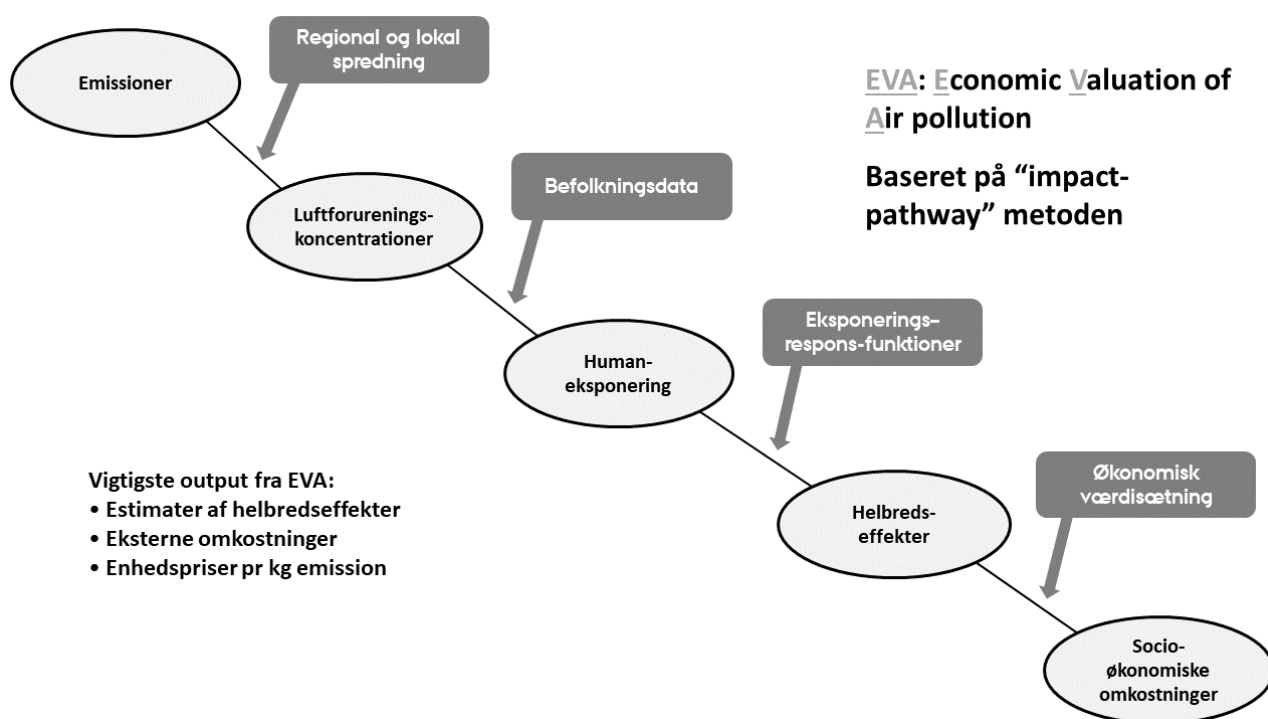
SO₂ var ikke inkluderet i de tidligere anbefalinger fra WHO (2013) og EVA inkluderede derfor en eksponering-respons-funktion fremkommet i ExternE projektet (Holland et al., 1999). I det nye WHO arbejde er SO₂ vurderet, og således at korttidseksponering for SO₂ i den nye EVA-version tillægges større risiko.

WHO begrundet bl.a. opdateringen og de ændrede anbefalinger med, at der i de senere år er kommet mange nye epidemiologiske studier ud fra både lav-, middel- og højindkomst lande, hvilket betyder, at der nu er en øget viden om de negative helbredseffekter relateret til relativt lave luftforureningsniveauer (WHO, 2021a). Dette underbygges af nye studier fra Danmark og de andre nordiske lande (Hvidtfeldt et al., 2019; So et al., 2020; Raaschou-Nielsen et al., 2020; 2023; Chen et al., 2021; 2022; Strak et al., 2021; Stafoggia et al., 2022). I afsnit 12.5 præsenteres sensitivitsberegninger med EVA, hvor bl.a. forskellige eksponering-respons-funktioner for PM_{2,5} baseret på disse studier er benyttet.

I beregningen af tabte leveår anvendes mortalitetsdata for den danske befolkning fra Danmarks Statistik. Der anvendes 2019 data i den nyeste version af EVA. Eksponerings-responsfunktionerne er baseret på en relativ risiko for at

dø tidligere end ellers og antallet af tilfælde af for tidlige dødsfald hænger derfor sammen med middellevetiden. Da middellevetiden er steget generelt i befolkningen, så medfører opdatering af mortalitetsdata, at der alt andet lige vil være færre for tidlige dødsfald end ved tidligere beregninger. Samtidig er det gennemsnitlige antal tabte leveår per dødsfald opdateret fra 10,6 til 11,4, hvilket også vil medføre færre for tidlige dødsfald sammenlignet med tidligere, idet antallet af for tidlige dødsfald relateret til luftforurening beregnes ud fra Years of Life Lost (YOLL) divideret med en faktor for det typiske antal tabte leveår i gennemsnit (nu 11,4).

Samlet set er den relative risiko øget for effekt af forurening med fine partikler, hvilket generelt trækker op i dødeligheden, mens andre ting som højere middellevealder og antal tabte leveår per dødsfald trækker ned.



Figur 1.4. Illustration af impact-pathway-metoden som anvendes i EVA-modelsystemet.

EVA-modelsystemet og de forskellige elementer i beregningerne er grundigt dokumenteret i Brandt et al. (2013a, 2013b, 2015). Beskrivelsen af de individuelle helbredseffekter i EVA-modelsystemet er dokumenteret i Brandt et al. (2013a, b) og Bønløkke et al. (2011) og de økonomiske værdisætninger er beskrevet og dokumenteret i Andersen et al. (2004, 2017) og Bach et al. (2006). Systemet er også sammenlignet med andre tilsvarende modeller i internationale studier (Anenberg et al., 2016; Lehtomaki et al., 2020) og anvendes løbende i diverse forskningsprojekter (Im et al., 2019; 2023; Geels et al., 2021).

2. Kvælstofdioxid, NO₂ og kvælstofoxider, NO_x

Kvælstofoxider (NO_x) er summen af kvælstofdioxid (NO₂) og kvælstofmonoxid (NO). De to gasser omdannes hurtigt til hinanden via de kemiske reaktioner i luften. Kvælstofdioxid har en direkte indvirkning på helbredet, mens kvælstofmonoxid i sig selv ikke giver helbredseffekter. Kvælstofoxiderne har imidlertid også en indirekte effekt på helbredet, idet de kan omdannes til fine partikler, som har store helbredsskadelige effekter (se Kapitel 7).

EU's luftkvalitetsdirektiv (EU, 2008) har fastlagt to grænseværdier til beskyttelse mod helbredseffekterne fra kvælstofdioxid, da der både er helbredseffekter ved langtids- og korttidseksponering:

- Grænseværdien af hensyn til langtidseffekter er fastlagt ud fra årsmiddelværdien af kvælstofdioxid, som ikke må overskride 40 µg/m³ i et kalenderår.
- Grænseværdien af hensyn til korttidseksponering for kvælstofdioxid er baseret på timemiddelværdier, hvor antallet af dage med timemiddelværdier over 200 µg/m³ ikke må overskride 18 i et kalenderår.

Kvælstofoxiderne er nogle af de mest betydningsfulde luftforureningskomponenter, hvilket er baggrunden for, at der er et omfattende overvågningsprogram. I 2021 er der således målt kvælstofdioxid og kvælstofoxider ved 14 målestationer fordelt på fem gademålestationer, fire bybaggrundsmålestationer, en målestation i forstad og fire målestationer i landlige baggrundsområder. Målingerne suppleres med modelberegninger for udvalgte gadestrækninger i København og Aalborg.

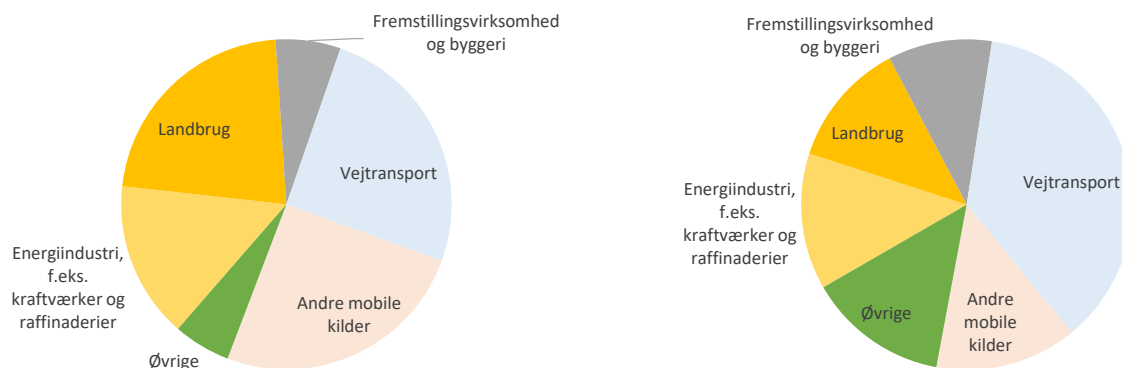
2.1 Udledninger

Den væsentligste kilde til udledning af kvælstofoxider (NO_x) er forbrænding. Der udledes en blanding af kvælstofdioxid og kvælstofmonoxid, som varierer mellem de forskellige typer af forbrænding og efterfølgende renseudstyr. Derfor er det kutyme at angive udledningerne af de to gasser i form af den samlede mængde af udledte kvælstofoxider i ækvivalenter af kvælstofdioxid.

I 2020 kom den største andel af de danske udledninger af kvælstofoxider fra vejtransport og andre mobile kilder, som hver bidrager med omkring 25% af udledningerne (Figur 2.1 og Tabel 2.1; Nielsen et al., 2022). Landbrug og forbrændingssektoren (energi og opvarmning) er tredje- og fjerdestørste kilde. Det samlede bidrag fra mobile kilder udgør omkring 50% af de samlede danske udledninger.

De samlede udledninger af kvælstofoxider er faldet med omkring 70% siden begyndelsen af 1990'erne (Figur 2.2; Nielsen et al., 2022). Det største fald er sket for forbrændingssektoren (omkring 86%), som i begyndelsen af 1990'erne var den største kilde sammen med vejtransportsektoren. Udledningerne fra vejtransport er også faldet betydeligt (omkring 80%), mens de øvrige kilder er faldet i mindre grad. Det store fald er opnået ved i stigende grad at indføre krav om katalysatorer på køretøjerne og indførelse af diverse teknologier (low NO_x burners, katalytisk eller ikke-katalytisk omdannelse (SCR/SNCR DeNO_x)) til reduktion af udledningerne fra forbrændingsanlæg (kraftvarmeverker og industrielle forbrændingsanlæg).

For EU-27 ses nogenlunde samme billede som for Danmark (Figur 2.1 og 2.2). Der er dog lidt forskelle i bidrag fra de største kilder, hvor for eksempel vejtransport udgør en relativt større andel for EU-27 end for Danmark.

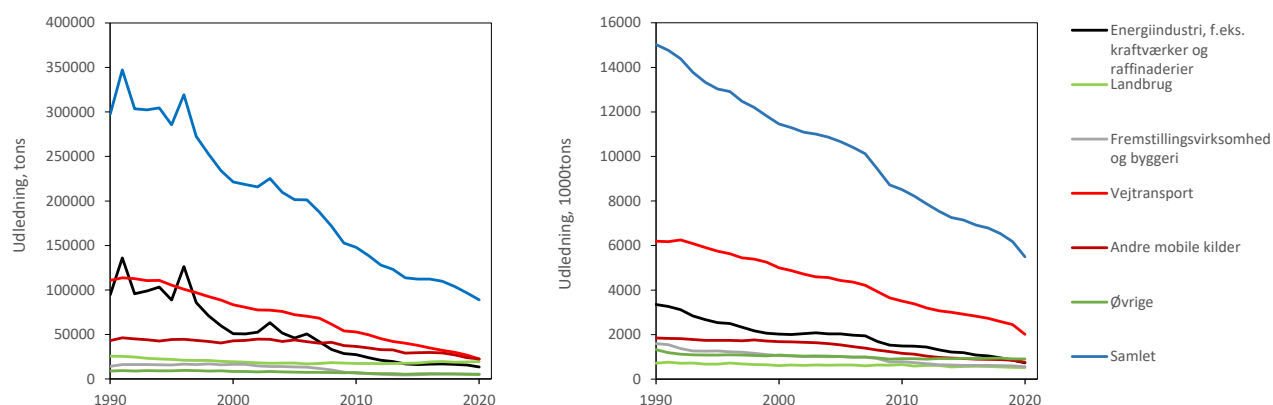


Figur 2.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af kvælstofoxider i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2020. Figureerne viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2022, CEIP, 2023).

Tabel 2.1. Kilderne til de menneskabte udledninger af kvælstofoxider i Danmark i 2020 (Nielsen et al., 2022). Kilderne er opgjort i 10 hovedkategorier med en yderligere underopdeling for "Ikke-industriel forbrænding" og "Vejtransport". Opdelingen er baseret på SNAP-koder (Selected Nomenclature for Air Pollution). Udledningerne angives i ækvivalenter af kvælstofdioxid, hvilket er standard i forbindelse med international rapportering af udledninger.

Kategori	SNAP-kode	Udledninger 2020	
		Tons	%
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	13685	15
Ikke-industriel forbrænding	2	4753	5
<i>Handel og service</i>	201	659	1
<i>Husholdninger</i>	202	3510	4
<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	203	584	1
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	5665	6
Industrielle processer	4	23	0
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	5	0	0
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	31	0
Vejtransport	7	22482	25
<i>Udstødning</i>	701-706	22482	25
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	0	0
Andre mobile kilder*	8	22463	25
Affald	9	170	0
Landbrug	3b,d,f-i	19753	22
Samlet		89025	100

* Data inkluderer national søfart, al flyvning under 3000 fod, togtrafik, militær, fritidsfartøjer, fiskeri, og arbejdsredskaber inden for landbrug, skovbrug, industri, handel/service og husholdninger.



Figur 2.2. Udviklingen i udledningerne af kvælstofoxider i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) siden 1990 (Nielsen et al., 2022; CEIP, 2023). Udledningerne angives i ækvivalenter af kvælstofdioxid (tons NO₂), hvilket er standard i forbindelse med international rapportering af udledninger.

2.2 Status for luftkvalitet

Tabel 2.2 giver en status for luftkvaliteten for kvælstofdioxid ved målestationerne i 2021. Årsmiddelmålingerne ligger ved alle målestationer under grænseværdien på 40 µg/m³, der er fastsat af hensyn til langtidseffekter (årsmiddelværdien af kvælstofdioxid, må ikke overskride 40 µg/m³ i et kalenderår (EU, 2008)). Selv ved den mest forurenede gademålestation (H.C. Andersens Boulevard) var årsmiddelværdien næsten 35% under grænseværdien.

Grænseværdien af hensyn til korttidseksponering for kvælstofdioxid er baseret på timemiddelværdier, hvor antallet af timer med timemiddelværdier over 200 µg/m³ ikke må overskride 18 i et kalenderår. Af tabel 2.2 fremgår, at den maksimale timemiddelværdi ved alle målestationer lå et godt stykke under 200 µg/m³. Der var dermed ingen overskridelse af grænseværdien for timemiddelværdien af kvælstofdioxid i 2021.

Der er dermed ingen overskridelse af de to grænseværdier for kvælstofdioxid i 2021.

Tabel 2.2. Årsmiddelkoncentrationer for kvælstofdioxid (NO₂) og kvælstofoxider (NO_x) i 2021, samt højeste timemiddelværdi for kvælstofdioxid. Endvidere vises grænseværdierne for kvælstofdioxid, der er baseret på årsmiddelværdi og timemiddelværdi, hvor timemiddelværdi højest må overskride 200 µg/m³ 18 dage på et kalenderår (EU, 2008). Kvælstofoxider angives i ækvivalenter af kvælstofdioxid (µgNO₂/m³), hvilket er standard i forbindelse med EU's luftkvalitetsdirektiv (EU, 2008).

	NO ₂ Årsmiddelværdi µg/m ³	NO ₂ Højeste timemiddelværdi µg/m ³	NO ₂ Antal gange med timemiddelværdi over 200 µg/m ³ antal gange	NO _x Årsmiddelværdi µg NO ₂ /m ³
Grænseværdi	40	200	18	
<i>Gade</i>				
København, H.C. Andersens Boulevard	27	114	0	53
København, Jagtvej	19	136	0	35
Odense, Grønløkkevej	12	72	0	20
Aarhus, Banegaardsgade	20	137	0	39
Aalborg, Vesterbro	20	112	0	45
<i>Bybaggrund</i>				
København	9,8	56	0	11
Odense	7,4	77	0	8,7
Aarhus	9,3	66	0	11
Aalborg	8,5	73	0	10
<i>Forstad</i>				
Hvidovre	11*	63*	0	14*
<i>Landbaggrund</i>				
Anholt	3,7	62	0	4,1
Keldsnor	6,0	76	0	6,7
Risø	5,3	47	0	5,8
Ulborg	3,3	26	0	3,8

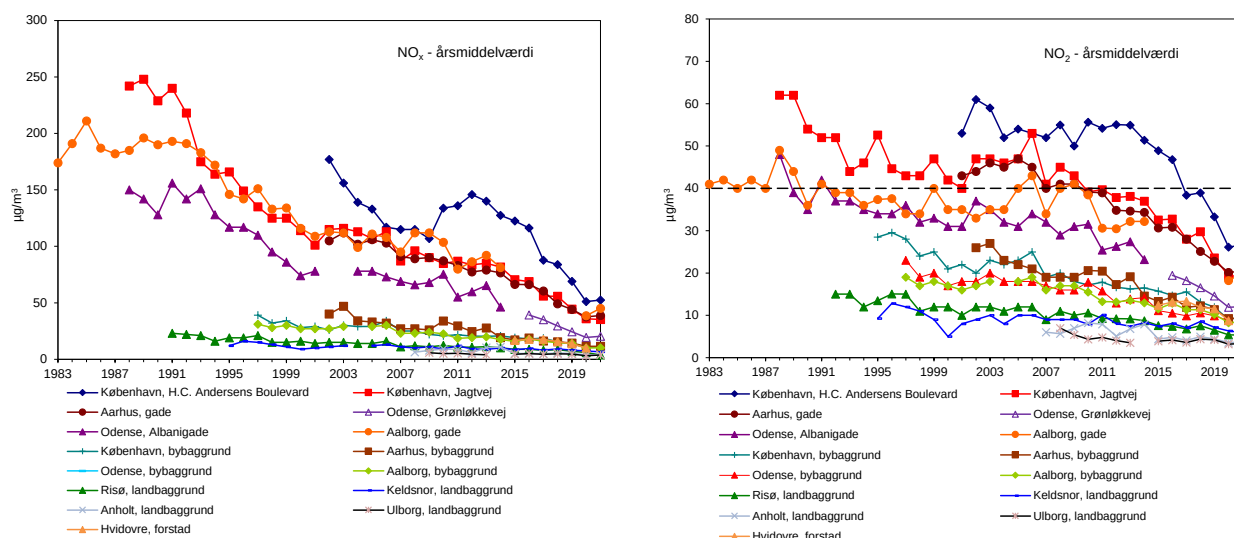
* Målestationen i Hvidovre blev flyttet i 2021. Derfor er der kun resultater fra omkring 6,5 måneder. De viste data ligger højere end den reelle årsmiddel, da der primært mangler data fra sommerperioden.

For kvælstofdioxid ses en væsentlig forskel mellem de målte koncentration-niveauer ved de fem gademålestationer, hvilket primært skyldes forskel i udledninger fra trafikken i de gader, hvor målestationerne er placeret. Endvidere ses også en forskel mellem årsmiddelkoncentrationerne ved gademålestationerne (12-27 µg/m³), bybaggrund (8-10 µg/m³), forstad (9 µg/m³) og på de landlige baggrundsmålestationer (3-6 µg/m³). I gennemsnit for gademålestationerne, så kommer omkring 50% fra gadebidraget, omkring 15% fra bybaggrund og 35% fra landbaggrund. Årsagen til denne fordeling er, at kvælstofoxiderne lever relativt kort tid i luften før de omdannes til en anden luftforureningskomponent eller bliver fjernet fra luften via deposition. Dette giver relativt store variationerne i koncentrationerne og et relativt stort bidrag fra de lokale kilder (her trafikken).

2.3 Udviklingstendens

Figur 2.3 viser udviklingstendenserne for årsmiddelværdierne af kvælstofoxiderne (NO_x) og kvælstofdioxid (NO₂). For kvælstofoxiderne ses et markant fald siden målingernes begyndelse i 1983. For gademålestationerne er der sket et fald på omkring 80% siden opstart af målingerne. For kvælstofdioxid ses et meget anderledes udviklingsforløb med et svagt fald i 1980'erne og begyndelsen af 1990'erne, som efterfølges af stort set uændrede niveauer i slut 1990'erne og begyndelsen af 2000'erne. Når udviklingstendens for kvælstofdioxid er anderledes end udviklingstenden for kvælstofoxiderne, så skyldes det de komplekse kemiske reaktioner i atmosfæren herunder reaktion

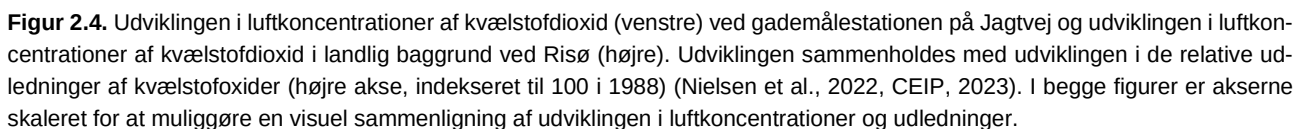
med ozon. Fra omkring 2005 og til i dag er der til gengæld sket en markant reduktion i luftkoncentrationerne af kvælstofdioxid på op mod 50%.



Figur 2.3. Udviklingstendens for årsmiddelværdier af NO_x (venstre) og NO₂ (højre). For NO₂ angiver den stiplede linje EU's grænseværdi (EU, 2008). Det markant anderledes forløb, som ses for H.C. Andersens Boulevard (navnlig for NO_x), skyldes omlægning af vejbanerne på H.C. Andersens Boulevard i 2010, som flyttede trafikken tættere på målestationen (for yderligere detaljer se Ellermann et al., 2020). Bemærk at årsmiddelværdierne for NO_x angives i ækvivalenter af NO₂; µgNO₂/m³.

Figur 2.4 (venstre) viser en sammenligning mellem faldet i luftkoncentrationerne af kvælstofdioxid ved målestationen ved Jagtvej sammenholdt med den relative udvikling i udledningerne af kvælstofoxider fra vejtransport. I perioden fra 1990 til omkring midten af 2000'erne ses et væsentligt mindre fald i målte koncentrationer sammenholdt med faldet i udledninger. Årsagen til forskellen er ændringer i køretøjssammensætning med stigende andel af dieselskøretøjer og stigende andel af oxiderende katalysatorer på dieselskøretøjerne. Disse ændringer har i samspil med de kemiske reaktioner i atmosfæren resulteret i, at de faktiske luftkoncentrationer stort set er uændret i perioden. Fra omkring midten af 2000'erne og fremefter indførtes i stadig stigende grad dieslbiler med katalysatorer, som stærkt begrænser udledningerne af kvælstofoxider fra dieselskøretøjerne, hvilket fører til det relativt store fald i luftkoncentrationerne fra omkring 2005 og frem. I denne periode ses god overensstemmelse med faldet i luftkoncentrationerne og udledningerne fra vejtransporten. Ændringerne i udledningerne spiller derfor den største rolle for ændringerne i luftkoncentrationerne, selv om ændringer i kemiske reaktioner mellem kvælstofoxiderne og ozon også spiller ind.

Figur 2.4 (højre) viser faldet i kvælstofdioxid ved landbaggrundsstationen ved Risø. Denne målestation er for størstedelen påvirket af den luftforurening, som transporteres med luften fra det øvrige Danmark og via langtransport fra de europæiske lande. Derfor følger udviklingen i luftkoncentrationerne faldet i de samlede udledninger i Danmark og EU.



Der er foretaget modelberegninger af årsmiddelkoncentrationer for kvælstofdioxid for udvalgte gader i København og Aalborg. De udvalgte gader repræsenterer trafikerede gader og er hovedsageligt lukkede gaderum, dvs. med bebyggelse på hver side af vejen. Koncentrationerne er forhøjede i denne type gader på grund af udledninger fra vejtrafikken og begrænsede spredningsforhold. Der er inkluderet 98 gadestrækninger i København og 26 i Aalborg.

Både København og Aalborg er blandt de fire miljøzonebyer i Danmark. Effekten af de skærpede miljøzoner vedtaget i 2019 er indregnet. De skærpede krav omfatter per 1. juni 2020, at alle busser skal være mindst Euro 5 (både bybusser og turistbusser) og dieselvarebiler skal være mindst Euro 4. Kravene er derfor fuldt implementeret i 2021.

Covid-19-restriktioner påvirkede til en vis grad trafikken i 2021 baseret på oplysninger fra Vejdirektoratet fra 30 tællesteder i Danmark (Vejdirektoratet, 2022). Fra et samlet niveau på ca. 30% under 2019 ved årsskiftet mellem 2020 og 2021 steg trafikken gradvist i løbet af 2021, og lå efter sommerferien atter på niveau med eller lidt over trafikken i 2019. Det var personbiler, som blev påvirket mest blandt de forskellige køretøjs-grupper. Samlet set var trafikken knap 7% lavere end før covid-19 i 2019. Disse forudsætninger om lavere trafikniveau og anderledes variation over året er der taget hensyn til ved modelberegningerne med OSPM.

Covid-19-restriktioner påvirkede også trafikken i 2020. Nedlukningen i marts 2020 førte til et kraftigt fald i sær personbiltrafikken, men trafikken ventede langsomt tilbage hen over foråret og sommeren 2020, og blev normal i uge 24, dvs. på samme niveau som i uge 9 før nedlukningen ifølge Vejdirektoratet. Vægtet over hele året blev trafikken reduceret med 5%. Trafikken i 2020 og 2021 er således på årsbasis næsten påvirket af covid-19-restriktionerne på samme måde, hvilket har betydning i sammenligning af modelresultaterne for luftkvalitet mellem 2020 og 2021.

2.4.1 Modelberegninger for København

Modelberegningerne af årsmiddelkoncentrationen af kvælstofdioxid for gadestrækninger i København i 2021 vises i Figur 2.5 som søjlediagram og i Figur 2.6 som kort. Gennemsnittet af årsmiddelkoncentrationerne for kvælstofdioxid i alle 98 gadestrækninger faldt meget lidt fra 2020 til 2021 med omkring $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, heraf omkring $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pga. reduktion af bybaggrundskoncentrationen. Målingerne på H.C. Andersens Boulevard viser uændret niveau og på Jagtvej et lille fald i årsmiddelkoncentrationerne af kvælstofdioxid fra 2020 til 2021, og bybaggrundsstationen på H.C. Ørsted Institutet en lille stigning, mens landstationen på Risø viste et lille fald. Samlet set er ændringerne meget små i målingerne fra 2020 til 2021.

Ændringer i gadekoncentrationerne er et resultat af en kombination af ændringer i trafikken, udledningsfaktorer, baggrundskoncentrationer og meteorologi.

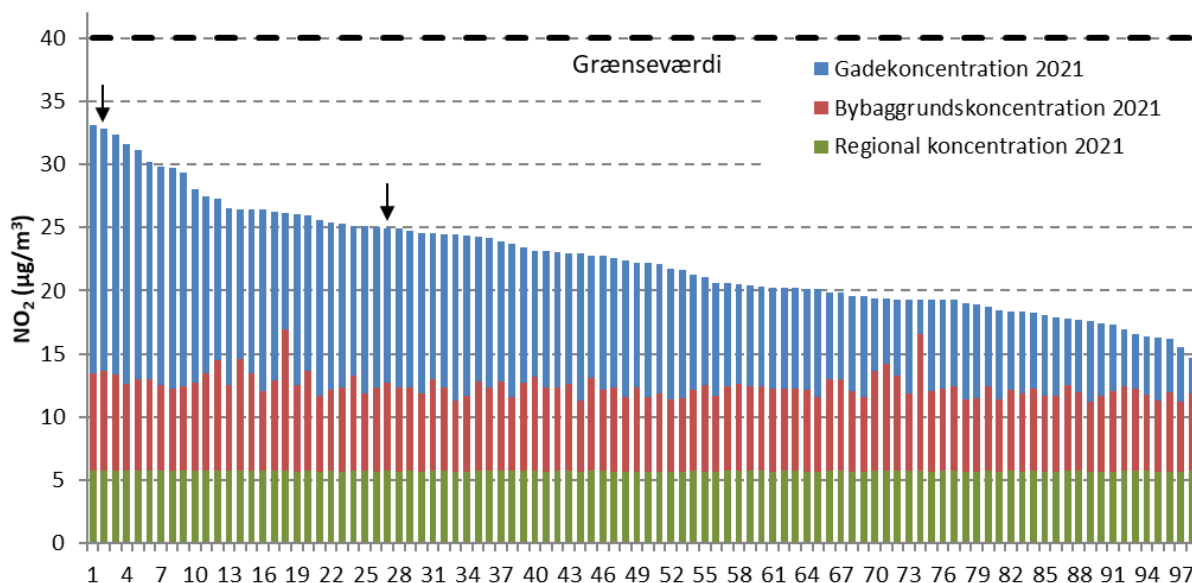
ÅDT (årsdøgntrafik - dvs. gennemsnitlig døgntrafik over et år) var mellem 5.000 og 80.000 køretøjer om dagen i København baseret på trafiktællinger udført i efteråret 2021. Den gennemsnitlige trafik for de 98 gader var stort set uændret fra 2020 til 2021 dog med et meget lille fald i den gennemsnitlige trafik på 0,2% og uændret andel af tunge køretøjer på 4,1%, hvilket alt andet lige fører til marginalt lavere beregnede koncentrationer. Der er antaget samme rejsehastigheder som sidste år. Der er sket mindre ændringer i ÅDT og i andelen af tunge køretøjer på nogle af de gadestrækninger, der indgår i modelberegningerne, hvilket kan påvirke resultaterne fra de enkelte gadestrækninger. Trafikken har i både 2020 og 2021 været påvirket af covid-19-restriktioner, hvor den samlede trafik var reduceret med hhv. 5% og 7% på årsplan. Reduktionerne var ikke ligeligt fordelt over året, men faldt i begge år i første halvdel af året. Derfor viste trafiktællingerne udført om efteråret ikke nogen effekt af covid-19-restriktioner, og trafiktællingerne viser stort set samme trafikniveauer i 2020 og 2021. I modelberegningerne er der taget hensyn til mindre trafik i første halvdel af 2021. På årsplan er trafikken stort set ens i 2020 og 2021, og ændringer i trafikniveau har dermed ikke bidraget til væsentlige ændringer i de beregnede luftkoncentrationerne mellem 2020 og 2021.

Udledningsfaktorerne for køretøjer viser et fald som følge af den generelle udskiftning af køretøjsparken, hvor stigningen i andel af Euro 6-køretøjer med lavere udledninger og udskiftning af ældre køretøjer med højere udledninger spiller en væsentlig rolle. Den direkte andel af kvælstofdioxid i udstødningen (den procentvis andel af kvælstofdioxid set i forhold til den samlede udledning af kvælstofoxider) er også faldet en smule fra 14% i 2020 til 12% i 2021. Alt andet lige, vil lavere udledningsfaktorer og lavere direkte NO_2 -andel føre til lidt lavere modelberegnete koncentrationer af kvælstofdioxid.

Gadekoncentrationerne er stort set uændrede eller med et meget lille fald fra 2020 til 2021. Dette er en kombination af stort set samme trafik, lidt lavere udledningsfaktorer, lidt højere baggrundskoncentration, og forskelle mellem meteorologien i 2020 og 2021.

I 2021 er der ingen modelberegnete overskridelser af grænseværdien for årsmiddelkoncentrationen for de 98 udvalgte gadestrækninger i København (Figur 2.5). Der blev heller ikke beregnet overskridelser i 2020 og 2019, men én meget lille overskridelse i 2018, og ingen i 2017. Resultaterne fra

modelberegningerne er i overensstemmelse med måleresultaterne, hvor der heller ikke blev observeret overskridelser i 2021, men modelberegningerne overestimerer dog generelt i forhold til målinger, se Bilag 1.



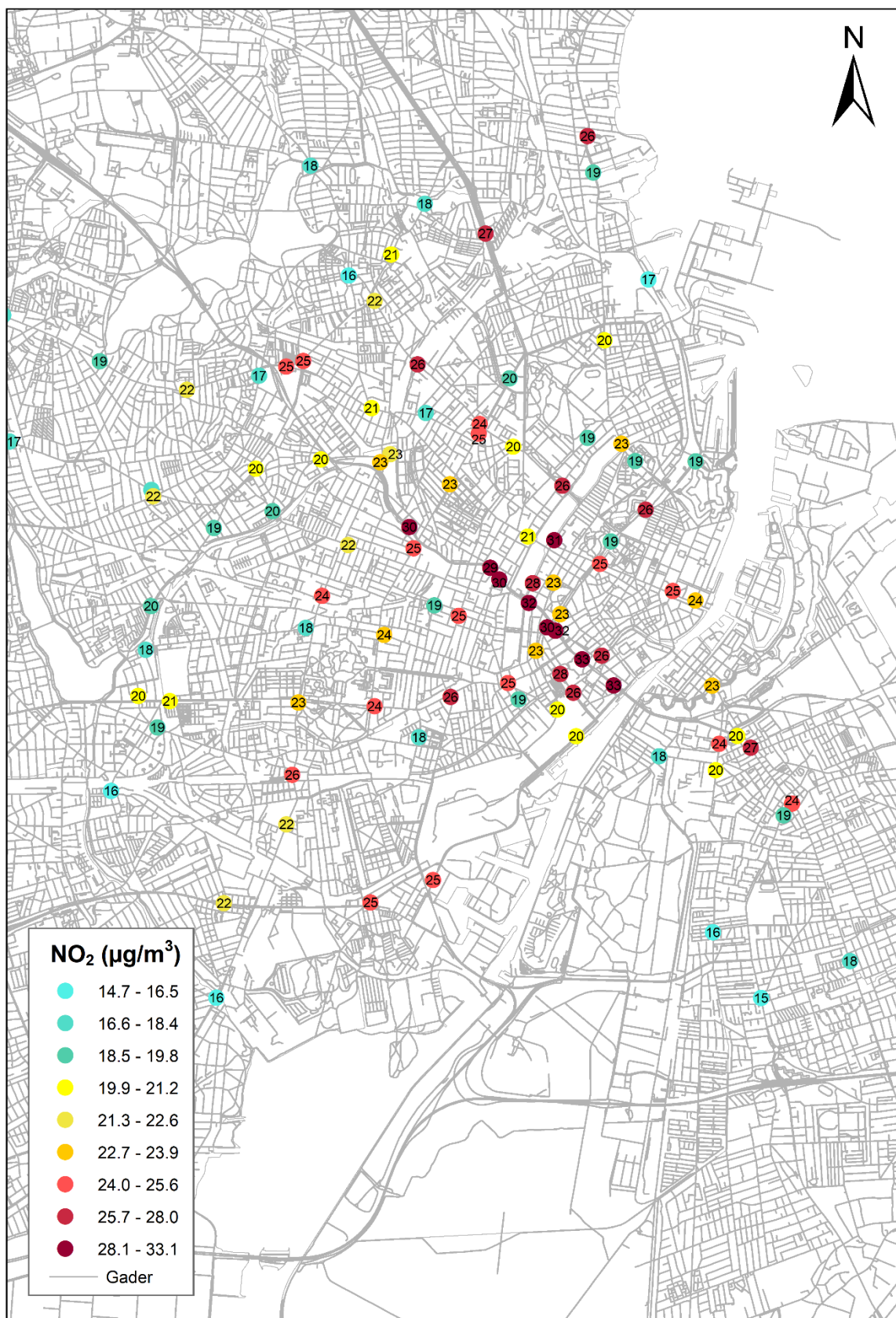
Figur 2.5. Årsmiddelkoncentrationer for kvælstofdioxid i 2021 for 98 udvalgte gadestrækninger i København baseret på modelberegninger. Bidraget fra trafikken i gaderne er baseret på gadeluftkvalitetsmodellen OSPM® (blå farve). Bybaggrundsbidraget (røddlig farve) er baseret på beregninger med baggrundsmodellen UBM med input fra den regionale langtransportmodel DEHM (grøn farve). Værdien for en gadestrækning er for den side af gaden, der har den højeste årsmiddelkoncentration af de to sider. Men for gader med en målestation er det den side, hvor stationen er placeret. Navnene på gaderne kan ses i tabel 2.3. Pile angiver gadestrækninger med en målestation.

Navnene på de 98 gadestrækninger angives i Tabel 2.3, og gadernes placering og de modelberegnete årsmiddelkoncentrationer kan ses i Figur 2.6.

Der er sket mindre ændringer i rangordningen af gaderne fra 2020 til 2021, hvilket primært er på grund af små ændringer i trafikken. Den højeste modelberegnete årsmiddelkoncentration for kvælstofdioxid i 2021 var på H.C. Andersens Boulevard (1) med 33,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Den anden højeste er, hvor målestationen er placeret på H.C. Andersens Boulevard, mens årsmiddelkoncentrationen er den 27. højeste ved målestationen på Jagtvej. I forhold til WHO's nye retningslinjer for luftkvalitet på 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for årsmiddelværdien af NO_2 (WHO, 2021a) er der overskridelser på samtlige gader i København.

Tabel 2.3. Rangnummer og navne for gadestrækninger, der er vist i figur 2.5 og 2.6. Gaderne er nummererede (1-98) i forhold til kvælstofdioxidniveauerne i 2021 (1 = højeste, 98 = laveste). Tallene i parentes refererer til forskellige delstrækninger af den samme gade, der har mere end én modelberegning. En stjerne (*) angiver en gadestrækningen med en målestation.

Nr.	Gadenavn	Nr.	Gadenavn	Nr.	Gadenavn
1	H C Andersens Boulevard(2)	34	Vesterbrogade(3)	67	Jagtvej(2)
2*	H C Andersens Boulevard(1)	35	Tagensvej(3)	68	Godthåbsvej(2)
3	H C Andersens Boulevard(3)	36	Amagerfælledvej	69	Grøndals Parkvej
4	Gyldenløvesgade	37	Toldbodgade	70	Dag Hammarskjølds Allé
5	Øster Søgade	38	Gammel Kongevej(1)	71	Folke Bernadottes Allé
6	Hammerichsgade	39	Vester Farimagsgade	72	Øster Voldgade(2)
7	Åboulevard(1)	40	Nørre Voldgade(2)	73	Bülowsvej(2)
8	Ågade	41	Nordre Fasanvej(3)	74	Strandvejen(2)
9	Åboulevard(3)	42	Jagtvej(3)	75	Rebildvej
10	Nørre Søgade	43	Østerbrogade(4)	76	Englandsvej(1)
11	Bernstorffsgade(1)	44	Søndre Fasanvej(2)	77	Istedgade
12	Lyngbyvej(2)	45	Nørre Farimagsgade	78	Frederikssundsvej(5)
13	Amagerbrogade(2)	46	Torvegade	79	Ålholmvej(2)
14	Øster Voldgade(1)	47	Hillerødgade(1)	80	Blegdamsvej
15	Bernstorffsgade(2)	48	Frederikssundsvej(8)	81	Frederiksborgvej(1)
16	Enghavevej	49	Tagensvej(1)	82	Vesterfælledvej
17	Fredensgade	50	Godthåbsvej(3)	83	Slotsherrensvej(2)
18	Strandvejen(1)	51	Jyllingevej(1)	84	Artillerivej
19	Tagensvej(2)	52	Gammel Køge Landevej(1)	85	Frederikssundsvej(2)
20	Stormgade	53	Folehaven(1)	86	Peter Bangs Vej(1)
21	Toftegårds Allé(1)	54	Tuborgvej(2)	87	Tuborgvej(1)
22	H.C. Ørsteds Vej(2)	55	Frederikssundsvej(1)	88	Amagerbrogade(3)
23	Frederikssundsvej(3)	56	Roskildevej(1)	89	Peter Bangs Vej(2)
24	Gothersgade(1)	57	Nørrebrogade	90	Slotsherrensvej(1)
25	Falkoner Alle(2)	58	Tagensvej(4)	91	Bellahøjvej
26	Tomsgårdsvej(2)	59	Kalvebod Brygge	92	Halmetgade
27*	Jagtvej(1)	60	Amager Boulevard	93	Strandvænget(2)
28	Scandiagade	61	Hulgårdsvej(2)	94	Røde Mellemvej(2)
29	Vesterbrogade(1)	62	Østerbrogade(1)	95	Gammel Køge Landevej(2)
30	P Knudsens Gade(2)	63	Røde Mellemvej(1)	96	Frederiksborgvej(2)
31	Bredgade	64	Hillerødgade(3)	97	Vigerslevvej(2)
32	Amagerbrogade(1)	65	Ålholmvej(1)	98	Englandsvej(2)
33	Nordre Fasanvej(1)	66	Ingerslevsgade		



Figur 2.6. Kortet viser placeringen af de udvalgte gadestrækninger i København og årsmiddelkoncentrationer for kvælstofdioxid i 2021. Det lille tal i prikkerne angiver årsmiddelkoncentrationen i µg/m³. Bidraget fra trafikken i gaderne er modelleret med OSPM®. Bybaggrundsbidraget er modelleret med UBM med input fra den regionale langtransportmodel DEHM. Værdien for en gadestrækning er for den side af gaden, der har den højeste årsmiddelkoncentration af de to sider. Men for gader med en målestation er det den side, hvor stationen er placeret. Navne og numre for gaderne er vist i Tabel 2.3. Kortet kan ses som en webGIS-tjeneste, se <https://augis.au.dk/portal/home/webmap/viewer.html?webmap=18aea5cfae834a1a85e6b53656b3e837>

2.4.2 Modelberegninger for Aalborg

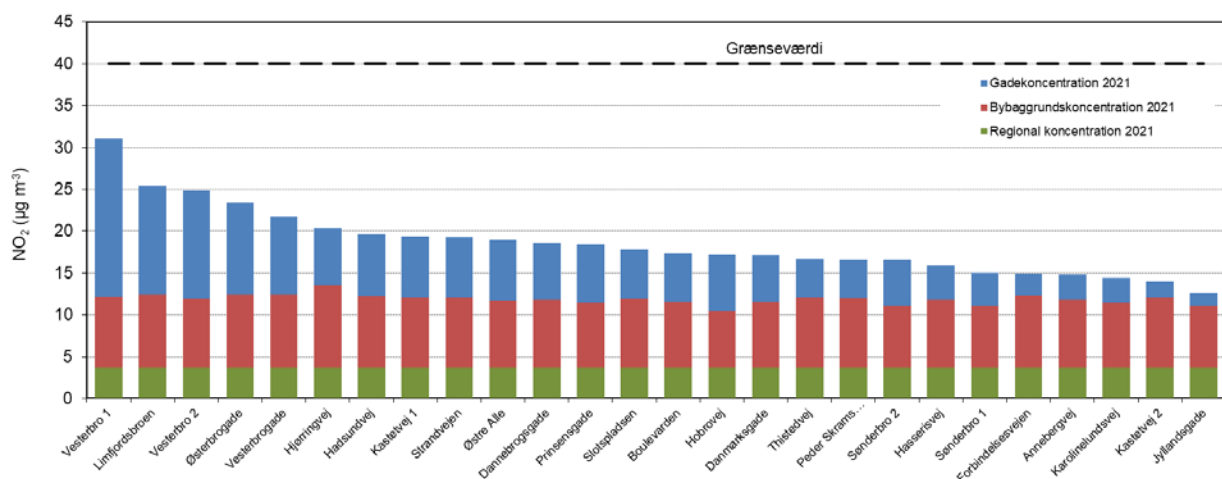
Fra 2018 til 2019 blev der lavet ændringer i udvalgte gadestrækninger, der laves modelberegninger for. Ændringerne er sket for at skabe størst mulig sammenhæng mellem de gader, hvor Aalborg Kommune jævnligt gennemfører trafiktællinger for at sikre det bedst mulige trafikale grundlag for luftkvalitetsberegningerne. I 2018 var der 31 udvalgte gadestrækninger, og i 2019 er der 26 gadestrækninger. De 26 gader er udvalgt, så de dækker hele byen, og der er valgt relativt trafikerede gadestrækninger, som i det fleste tilfælde også er i lukkede gaderum med bebyggelse på begge sider af vejen. Samme 26 gadestrækninger indgår i luftkvalitetsberegningerne for 2021.

ÅDT var mellem 1.900 og 36.400 køretøjer om dagen i Aalborg. I gennemsnit er ÅDT marginalt lavere i 2021 i forhold 2020. Den samlede trafik er faldet med omkring 0,3%, som dækker over lidt flere person- og varebiler og noget færre tunge køretøjer. Alt andet lige, vil det give mindre ændringer i udledningerne. Rejsehastigheden er antaget at være uændret. Den generelle udvikling mod lavere udledningsfaktorer for de enkelte biler pga. bilparkens løbende udskiftning bidrager, alt andet lige, til lavere udledninger fra trafikken.

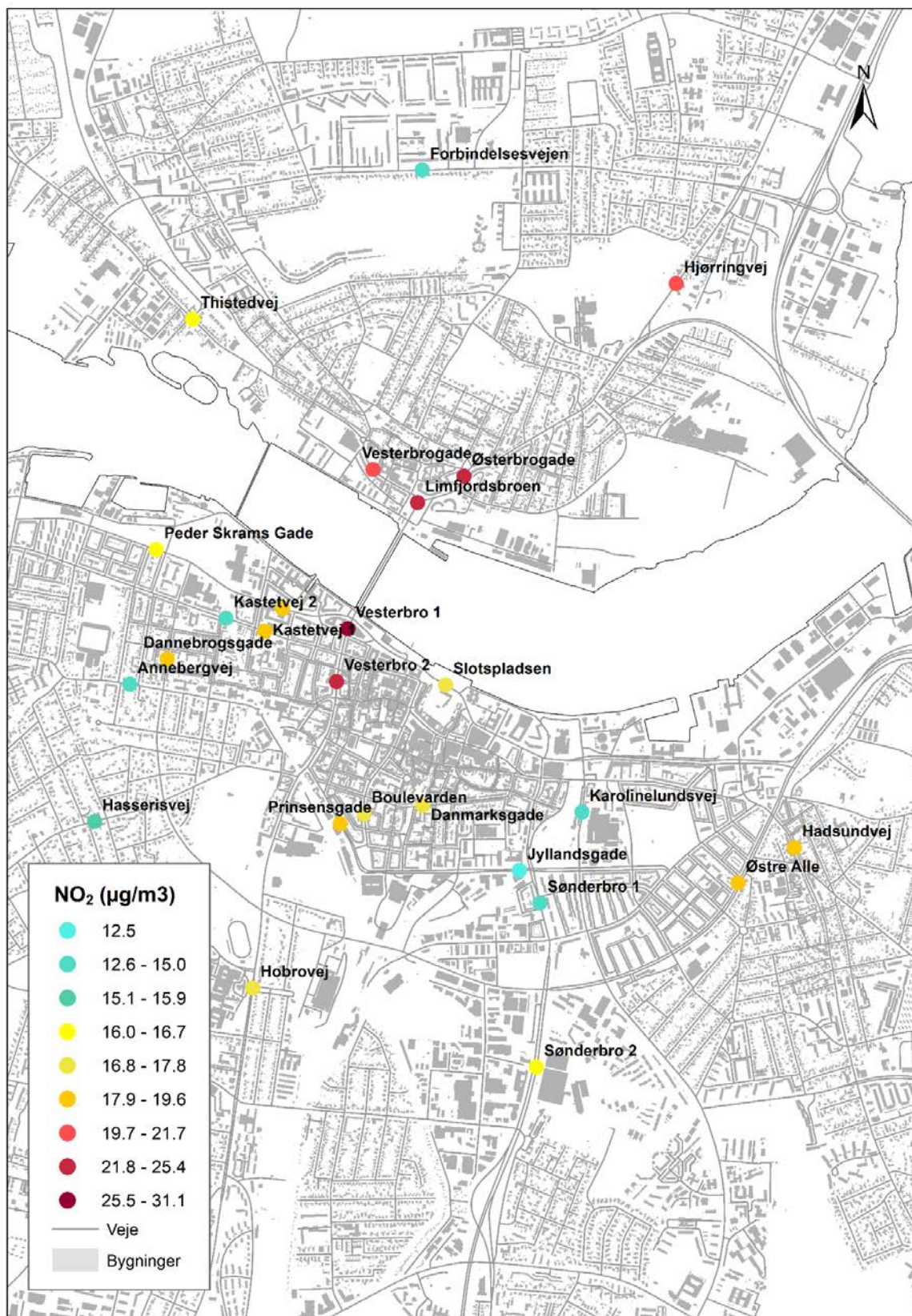
Årsmiddelkoncentrationerne for kvælstofdioxid for de 26 udvalgte gadestrækninger ligger i intervallet fra 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ og op til 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figur 2.7). Gennemsnitligt ligger årsmiddelkoncentrationerne for de 26 udvalgte gadestrækninger i 2021 omkring 1,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ højere end den gennemsnitlige årsmiddelkoncentration for 2020, som også skyldes højere beregnede koncentrationer i bybaggrund og regional baggrund. Målingerne viser tilsvarende lidt højere koncentrationer i 2021 i forhold til 2020 ved gadestationen og ved bybaggrundsstationen.

I november 2019 startede målingerne på den nye placering på Vesterbro (Vesterbro 2). Den tidligere placering af målestationen var tættere på Limfjorden (Vesterbro 1). Bemærk at den højeste beregnede NO_2 -koncentration er for gadestrækningen, hvor den tidligere målestationen lå, men på den modsatte side af den tidligere placering af målestationen, da beregningerne viser højere koncentrationer på denne side, og det er den maksimale koncentration af de to sider, som vises. Den tredje højeste koncentration beregnes, hvor den nuværende målestation er placeret.

Ifølge modelberegningerne blev grænseværdien for årsmiddelkoncentration (40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) i 2021 ikke overskredet på nogen af de 26 udvalgte gader (Figur 2.7 og 2.8). I forhold til WHO's nye retningslinjer for luftkvalitet på 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for årsmiddelværdien af NO_2 (WHO, 2021a) er der overskridelser på samtlige gader i Aalborg.



Figur 2.7. Årsmiddelkoncentrationer for kvælstofdioxid i 2021 for 26 udvalgte gadestækninger i Aalborg baseret på modelberegninger. Bidraget fra trafikken i gaderne er baseret på gadeluftkvalitetsmodellen OSPM® (blå farve). Bybaggrundsbidraget (rødlig farve) er baseret på beregninger fra baggrundsmodellen UBM med input fra den regionale langtransportmodel DEHM (grøn farve). Værdien for en gadestækning er for den side af gaden, der har den højeste årsmiddelkoncentration af de to sider. Vesterbro 2 er den gadestækning, hvor målestationen ligger. Målestationen blev taget i brug i november 2019. Målestationen er flyttet fra en tidligere placering på Vesterbro, som lå tættere på Limfjorden (Vesterbro 1).



Figur 2.8. Kortet viser placeringen af de udvalgte gadestrekninger i Aalborg og årsmiddelkoncentrationer for kvælstofdioksid i 2021. Bidraget fra trafikken i gaderne er modelleret med OSPM®. Bybaggrundsbidraget er modelleret med UBM med input fra den regionale langtransportmodel DEHM. Værdien for en gadestrekning er for den side af gaden, der har den højeste årsmiddelkoncentration af de to sider. Men for gader med en målestation er det den side, hvor stationen er placeret. I Aalborg er målestationen placeret på Vesterbro (Vesterbro 2) siden november 2019, og har tidligere været placeret på Vesterbro 1. Kortet kan ses som en webGIS-tjeneste, se <https://augis.au.dk/portal/home/webmap/viewer.html?web-map=756b920f00cc4fc6a8057d9ceb25c28d>

2.4.3 Udvikling i modellerede overskridelser af kvælstofdioxid

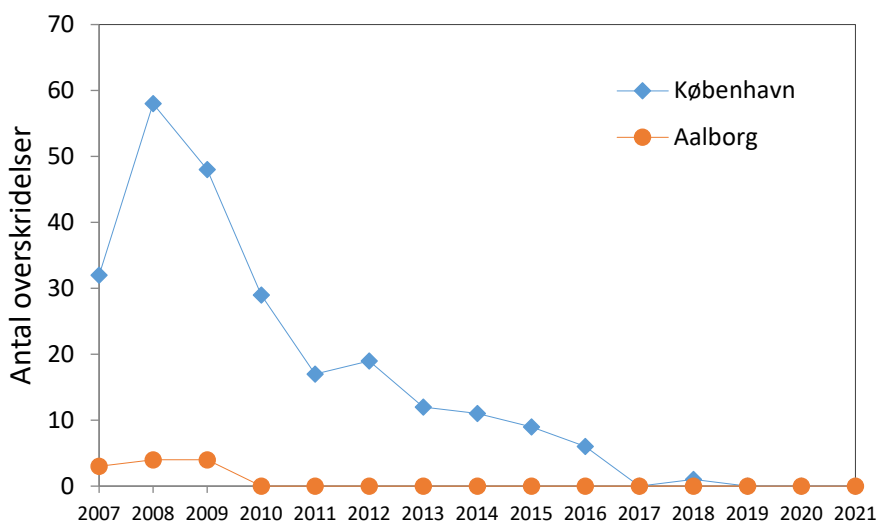
Figur 2.9 viser udviklingen i antallet af overskridelser af årsmiddelkoncentrationen af kvælstofdioxid for de udvalgte gadestrækninger i København og Aalborg.

Grænseværdien på $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for årsmiddelkoncentrationen af kvælstofdioxid skulle være opfyldt i 2010 (EU, 2008). Luftkvalitetsdirektivet indeholder endvidere en mekanisme, som skulle anspore medlemsstaterne til løbende at nærme sig grænseværdien i perioden fra 1999 frem til 2010. I 2007 skulle årsmiddelkoncentrationerne således ligge under $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (grænseværdi plus en tolerancemargin på $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), i 2008 skulle den ligge under $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ og i 2010 skulle selve grænseværdien overholdes.

For København er antallet af overskridelser faldet fra 58 i 2008 til seks i 2016, og yderligere til nul i 2017, én i 2018, og til nul siden 2019. Hovedårsagen til stigningen i antallet af overskridelser i København fra 32 i 2007 til 58 i 2008 er det ovenfor beskrevne fald i grænseværdi plus tolerancemargin. Dette fald i grænseværdi plus tolerancemargenen fører til et højere antal gadestrækninger med overskridelser i 2008 i forhold til 2007. Hvis grænseværdien plus tolerancemargenen havde været $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2007, ville antallet af gadestrækninger, der overskrider grænseværdien plus tolerancemargenen, have været 53. Nogenlunde samme niveau som i 2008.

I København omfatter analysen 138 gader i 2007 og frem til 2010, 99 gader i 2011 og 2012 og 98 gader i de følgende år. Reduktionen i antallet af inkluderede gader fra 2011 og fremefter blev gennemført for at forbedre modelberegningerne ved at skabe bedre sammenhæng mellem de udvalgte gadestrækninger, og de steder Københavns Kommune gennemfører manuelle trafiktællinger.

For Aalborg blev der i årene 2007-2009 modelleret tre til fire overskridelser af grænseværdien, mens der ingen har været siden 2010. Her omfatter analysen 32 gader fra 2007 til 2010, 31 gader i perioden 2011-2018, og 26 gader siden 2019.



Figur 2.9. Udviklingstendenser i antallet af modellerede overskridelser af grænseværdien for årsmiddelkoncentrationen af kvælstofdioxid i København og Aalborg.

I forhold til WHO's nye retningslinjer for luftkvalitet på $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for årsmiddelværdien af kvælstofdioxid (WHO, 2021a) er der overskridelser på samtlige gader i København og Aalborg.

3. Carbonmonoxid, CO

Carbonmonoxid er en sundhedsskadelig gas. Kilderne til carbonmonoxid er hovedsageligt menneskeskabt forbrænding af forskellige former for brændstoffer i forbindelse med energiproduktion, transport og opvarmning.

Carbonmonoxid er omfattet af EU's luftkvalitetsdirektiv, hvor der er fastlagt en grænseværdi til beskyttelse af befolkningen mod helbredseffekterne som følge af korttidseksponering for carbonmonoxid. EU's grænseværdi angiver, at den maksimale 8-timersmiddelværdi ikke må overstige $10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i løbet af kalenderåret (EU, 2008).

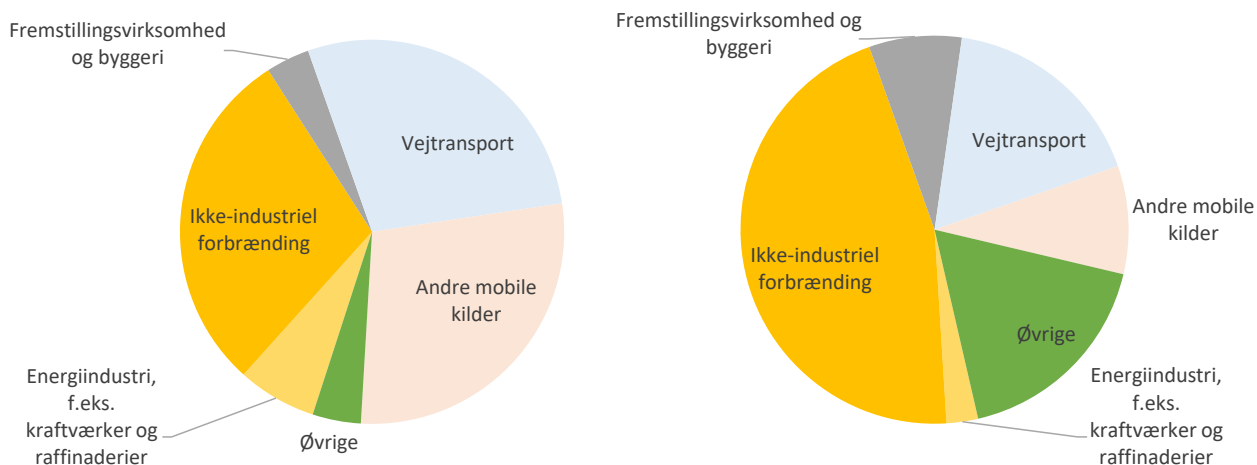
Status og udvikling i luftkoncentrationerne af carbonmonoxid blev i 2021 målt på fire gademålestationer, en bybaggrundsmålestation og en landbaggrundsmålestation.

3.1 Udledninger

I 2020 kom de største bidrag til udledningerne af carbonmonoxid omtrent ligeligt fra ikke-industriel forbrænding, vej- og andre mobile kilder (Figur 3.1 og Tabel 3.1; Nielsen et al., 2021). Til sammen udgør disse tre kilder omkring 90% af de samlede udledninger.

De samlede udledninger af carbonmonoxid er faldet med omkring 73% siden begyndelsen af 1990'erne (Figur 3.2; Nielsen et al., 2022). Det største fald er sket for vejtransport (omkring 90%), som tidligere var langt den mest dominerende kilde (Figur 3.2). Det store fald er opnået ved indførelse af katalysatorer på køretøjerne fra begyndelsen af 1990'erne. Til gengæld er de ikke-industrielle udledninger faldet betydeligt mindre med det resultat, at de ikke-industrielle udledninger i dag udgør samme andel som vejtransport og andre mobile kilder.

Udledningerne af carbonmonoxid på EU-niveau følger i store træk det samme mønster som for Danmark (Figur 3.1 og 3.2). Dog er der forskel i bidraget fra de største kilder, hvor navnlig vejtransport og andre mobile kilder udgør en større andel i Danmark end på EU-niveau. Til gengæld er ikke-industriel forbrænding den største kilde i EU.

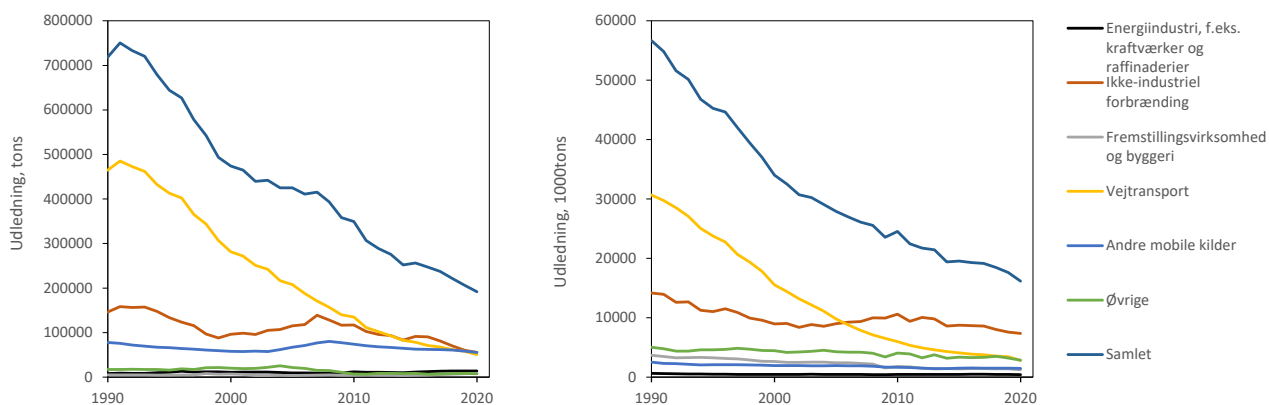


Figur 3.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af carbonmonoxid i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2020. Figureerne viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2022, CEIP, 2023).

Tabel 3.1. Kilderne til de menneskeskabte udledninger af carbonmonoxid i Danmark i 2020 (Nielsen et al., 2022). Kilderne er opgjort i 10 hovedkategorier med en yderligere underopdeling for "Ikke-industriel forbrænding" og "Vejtransport". Opdelingen er baseret på SNAP-koder (Selected Nomenclature for Air Pollution).

Kategori	SNAP-kode	Udledninger	
		Tons	2020 %
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	13737	7
Ikke-industriel forbrænding	2	60312	29
<i>Handel og service</i>	201	878	0
<i>Husholdninger</i>	202	54958	27
<i>Land, skovbrug og akvakultur</i>	203	4475	2
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	7581	4
Industrielle processer	4	13	0
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	5	0	0
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	3032	1
Vejtransport	7	57796	28
<i>Udstødning</i>	701-706	57796	28
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	0	0
Andre mobile kilder*	8	58355	28
Affald	9	1545	1
Landbrug	3b,d,f-i	3799	2
Samlet		206169	100

* Data inkluderer national søfart, al flyvning under 3000 fod, togtrafik, militær, fritidsfartøjer, fiskeri, og arbejdsredskaber inden for landbrug, skovbrug, industri, handel/service og husholdninger.



Figur 3.2. Udviklingen i udledninger af carbonmoxid i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) siden 1990 (Nielsen et al., 2022; CEIP, 2023).

3.2 Status for luftkvalitet

Carbonmonoxid blev i 2021 målt ved gademålestationerne i København, Odense og Aarhus samt ved bybaggrundsmålestationen i København og landbaggrundsmålestationen ved Risø. Tabel 3.2 angiver årsmiddelværdien og resultaterne for den maksimale 8-timersmiddelværdi. Den højest målte maksimale 8-timersmiddelværdi udgør kun omkring 9% af grænseværdien, og ved alle målestationerne ligger de målte koncentrationer således langt under grænseværdien.

Tabel 3.2. Årsmiddelværdi for carbonmonoxid i 2021 samt den maksimale 8-timersmiddelværdi. Endvidere angives grænseværdien for CO (EU, 2008).

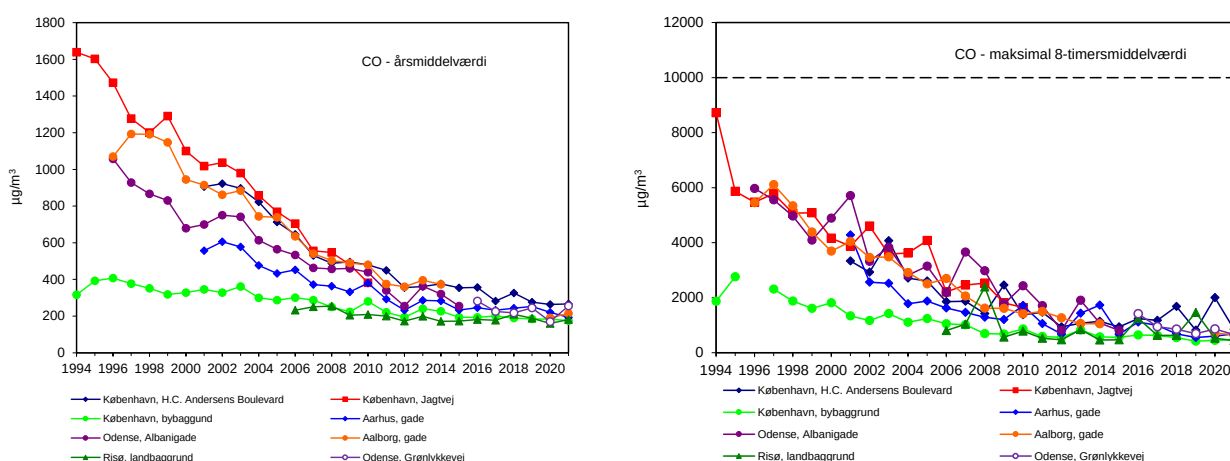
	Årsmiddel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Maksimal 8-timersmiddelværdi $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Grænseværdi		10.000
<i>Gade</i>		
København, H.C. Andersens Boulevard	266	852
Odense, Grønløkkevej	256	659
Aarhus, Banegaardsgade	194	686
Aalborg, Vesterbro	215	659
<i>Bybaggrund</i>		
København	176	481
<i>Landbaggrund</i>		
Risø	181	444

Koncentrationsniveauet er nogenlunde på samme niveau ved gademålestationerne i København, Odense og Aarhus. Ved gademålestationerne i 2021 stammer mindst 70% af carbonmonoxid fra den regionale baggrund. Resten stammer fra udledningerne fra trafikken i den pågældende gade (gadebidraget).

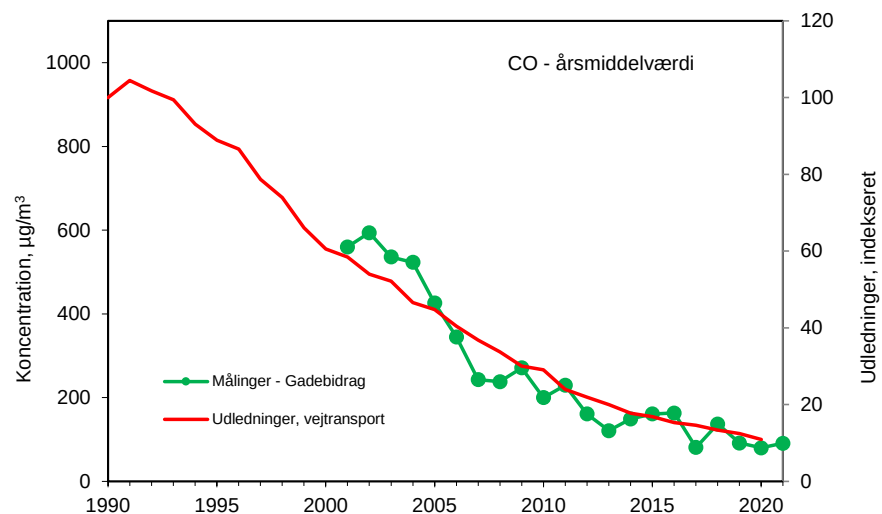
3.3 Udviklingstendens

Figur 3.3 viser udviklingstendens for årsmiddelværdien og den maksimale 8-timersmiddelværdi for carbonmonoxid. For begge parametre er der sket et stort fald siden målingernes begyndelse i 1990'erne, og i 2021 lå de målte koncentrationer ved gademålestationerne på omkring 20% af niveauerne i midten af 1990'erne.

Det store fald på de danske gademålestationer skyldes hovedsageligt det store fald i danske udledninger fra vejtransport. Figur 3.4 viser, at gadebidraget til luftkoncentrationerne ved målestationen på H.C. Andersens Boulevard i store træk følger faldet i udledningerne fra vejtransporten.



Figur 3.3. Årsmiddelværdier (venstre) og de maksimale 8-timersmiddelværdier (højre) for carbonmonoxid. Den stiplede linje i den højre figur angiver EU's grænseværdi.



Figur 3.4. Udviklingen i gadebidraget til luftkoncentrationerne af carbonmonoxid (venstre akse) ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard sammenholdt med den relative udvikling i udledningerne af carbonmonoxid (højre akse, indekseret til 100 i 1990) (Nielsen et al., 2022). Gadebidraget beregnes som forskel mellem de målte koncentrationer på gademålestation (H.C. Andersens Boulevard) fratrasket målte koncentrationer i bybaggrund i København (H.C. Ørsted Institutet).

4. Svovldioxid, SO₂

Svovldioxid er giftigt for mennesker i høje koncentrationer, og eksponering for svovldioxid kan derfor medføre negative helbredseffekter. Luftkoncentrationerne er i dag meget lave i forhold til tidligere, så derfor er helbredseffekterne fra svovldioxid på et lavt niveau. Kilderne til svovldioxid er hovedsageligt menneskeskabt forbrænding af olie og kul.

Svovldioxid er omfattet af EU's luftkvalitetsdirektiv (EU, 2008), hvor der er fastlagt to grænseværdier til beskyttelse af befolkningen mod helbredseffekterne som følge af korttidseksponering for svovldioxid:

- Den ene grænseværdi er baseret på timemiddelkoncentrationen af svovldioxid, hvor timemiddelkoncentrationen ikke må overskride 350 µg/m³ mere end 24 gange på et kalenderår.
- Den anden grænseværdi er baseret på døgnmiddelkoncentrationen af svovldioxid, hvor døgnmiddelkoncentrationen ikke må overskride 125 µg/m³ mere end 3 gange på et kalenderår.

De lave luftkoncentrationer af svovldioxid i Danmark gør det muligt kun at gennemføre en begrænset overvågning af svovldioxid. Svovldioxid blev i 2020 kun målt med gasmonitører med høj tidsopløsning (1/2-timesmiddelværdier) ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard i København og på gademålestationen i Aalborg.

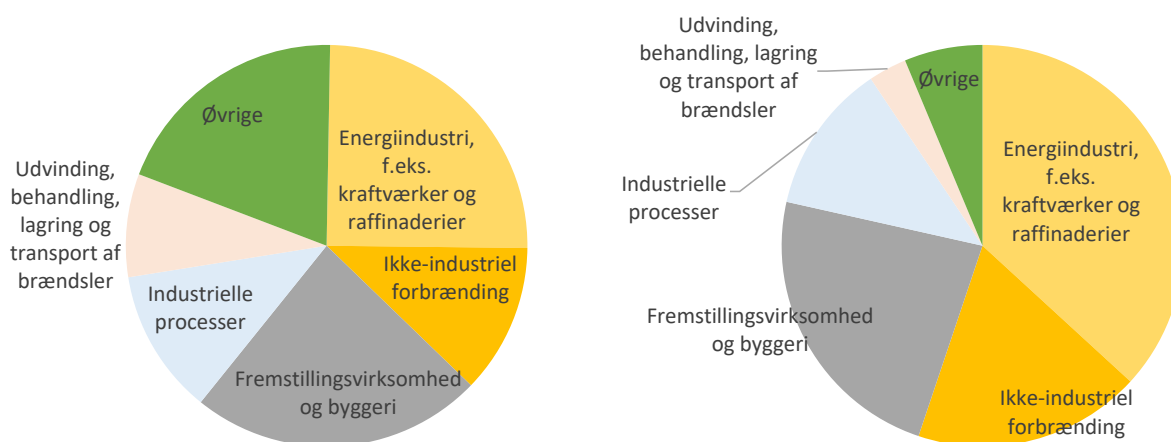
I forbindelse med landbaggrundsmålestationerne foretages også målinger af svovldioxid på døgnmiddelbasis med de såkaldte filterpack-opsamlere (se Ellermann et al., 2021 for yderligere detaljer).

4.1 Udledninger

Udledningerne af svovldioxid fra danske kilder har gennem de seneste mange årtier været helt domineret af udledningerne fra afbrænding af navnlig olie og gas, energiindustrien spiller en meget stor rolle. Afsvovlingsanlæg på forbrændingsanlæggene og brug af svovlfattigt brændstof har givet en meget stor reduktion af udledningerne, men selv i 2020 kommer den største del af udledningerne af svovldioxid fra afbrænding af kul, olie og andre brændsler i navnlig energiindustrien. Udledningerne fra fremstillingsvirksomhed og byggeri er dog på næsten samme niveau som udledningerne fra energiindustrien (Figur 4.1 og Tabel 2.1; Nielsen et al., 2022). Forbrænding i forbindelse med energiproduktion og affald, fremstillingsvirksomhed og byggeri samt industrielle processer er de tre vigtigste kildetyper, mens vejtransport kun spiller en lille rolle.

De samlede udledninger af svovldioxid er faldet med omkring 95% siden begyndelsen af 1990'erne (Figur 4.2; Nielsen et al., 2022). Det store fald er opnået ved ovennævnte tiltag over for udledningerne fra afbrænding af olie og kul, hvilket har ført til omkring 98% reduktion i udledningerne fra forbrændingsanlæg i forbindelse med energiproduktion og affald.

Det er de samme kilder, som bidrager mest til udledningerne af svovldioxid i EU-27 som i Danmark. Udledningerne fra energifremstilling betyder dog væsentligt mere på EU-niveau end i Danmark (Figur 4.1). Faldet i udledningerne er endvidere sket væsentligt hurtigere i Danmark end i EU-27 (Figur 4.2).

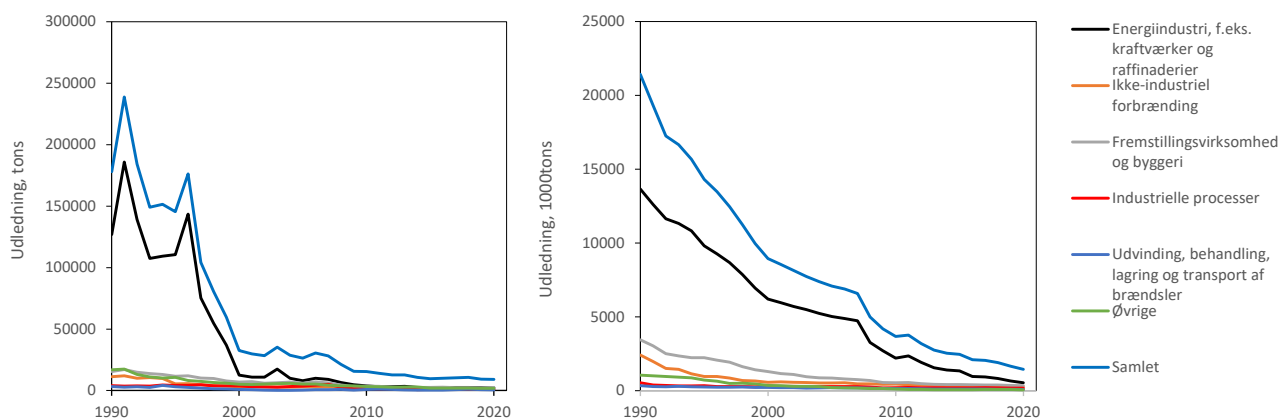


Figur 4.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af svovldioxid i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2020. Figureerne viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2022, CEIP, 2023).

Tabel 4.1. Kilderne til de menneskabte udledninger af svovldioxid i Danmark i 2020 (Nielsen et al., 2022). Kilderne er opgjort i 10 hovedkategorier med en yderligere underopdeling for "Ikke-industriel forbrænding" og "Vejtransport". Opdelingen er baseret på SNAP-koder (Selected Nomenclature for Air Pollution).

Kategori	SNAP-kode	Udledninger	
		Tons	2020 %
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	2326	25
Ikke-industriel forbrænding	2	1125	12
Handel og service	201	47	1
Husholdninger	202	741	8
Land, skovbrug og akvakultur	203	338	4
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	2200	24
Industrielle processer	4	1093	12
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	5	776	8
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	41	0
Vejtransport	7	76	1
Udstødning	701-706	76	1
Ikke-udstødning	707-708	0	0
Andre mobile kilder *	8	585	6
Affald	9	1089	12
Landbrug	3b,d,f-i	28	0
Samlet		9340	100

* Data inkluderer national søfart, al flyvning under 3000 fod, togtrafik, militær, fritidsfartøjer, fiskeri, og arbejdsredskaber inden for landbrug, skovbrug, industri, handel/service og husholdninger.



Figur 4.2. Udviklingen i udledninger af svovldioxid i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) siden 1990 (Nielsen et al., 2022; CEIP, 2023).

4.2 Status for luftkvalitet

Tabel 4.2 angiver de vigtigste resultater for 2021 i relation til grænseværdier. Der er i EU's luftkvalitetsdirektiv (EU, 2008) fastlagt to grænseværdier af hensyn til begrænsning af befolkningens korttidseksposering for svovldioxid. Begge grænseværdier er overholdt, og både den højeste timemiddel- og døgnmiddelværdien ligger langt under de fastsatte grænser. Ved landbaggrunds-målestationerne ligger koncentrationerne på omkring 10-20% af niveauerne på gademålestationerne på H.C. Andersens Boulevard i København og Vesterbro i Aalborg.

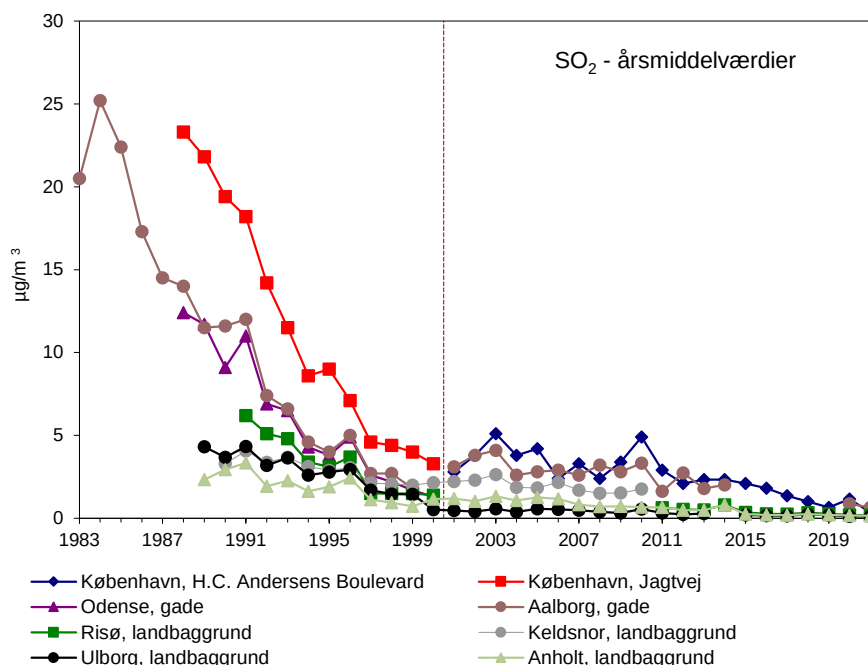
Tabel 4.2. Årsmiddelværdi for svovldioxid i 2021 og en række andre parametre til vurdering af overholdelse af de i EU fastlagte målsætninger for svovldioxid (EU, 2008). For svovldioxid er der to grænseværdier. Den ene er baseret på timemiddelværdien, hvor timemiddelværdien højest må overskride $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 gange i et kalenderår. Den anden er baseret på døgnmiddelværdien, hvor døgnmiddelværdien højest må overskride $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tre gange i et kalenderår. Målingerne ved gademålestationerne er baseret på timemiddelkoncentrationer med automatiske gasmonitører, mens målingerne ved landbaggrunds-målestationerne er baseret på døgnmiddelmålinger ved hjælp af filterpack-opsamlere (og derfor er der ikke data fra landbaggrunds-målestationerne vedrørende timemiddelværdier).

	Årsmiddel- værdi	Højeste time- middelværdi	Antal timer med timemid- delværdi over $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Højeste døgn- middelværdi	Antal dage med døgnmiddel- værdi over $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Antal timer	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Antal dage
Grænseværdi		350	24	125	3
<i>Gade</i>					
København, H.C. Andersens Boulevard	0,4	11	0	2,6	0
Aalborg, Vesterbro	0,7	54	0	12	0
<i>Landbaggrund</i>					
Risø	0,2			1,4	0
Anholt	0,2			1,2	0
Tange	0,1			0,9	0
Ulborg	0,1			1,0	0

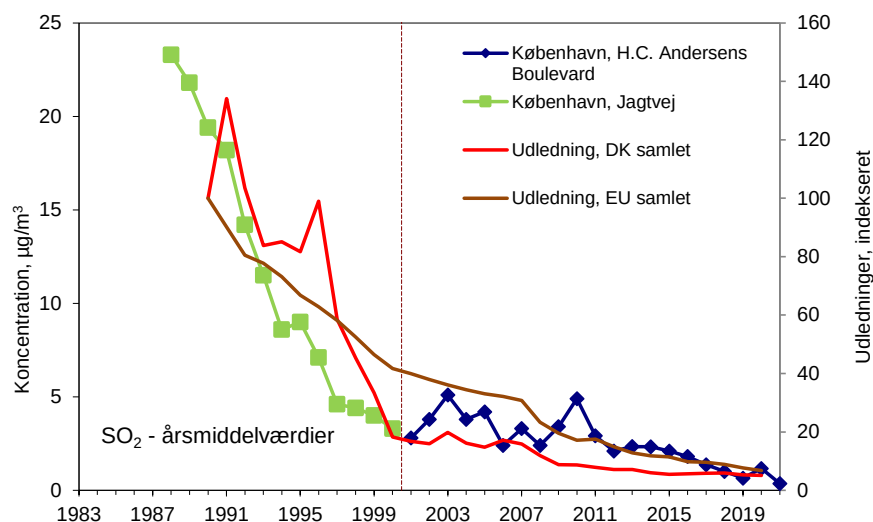
4.3 Udviklingstendens

Figur 4.3 viser udviklingstendensen for årsmiddelværdierne af svovldioxid. Luftkoncentrationerne er faldet markant siden begyndelsen af 1980'erne. I dag udgør de målte luftkoncentrationer på gademålestationer omkring 3% af de målte luftkoncentrationer i 1980'erne. For landbaggrund ses også et markant fald, hvor koncentrationerne i 2021 udgør omkring 4% af koncentrationerne ved opstart af målingerne i 1991.

Årsagen til det store fald skyldes reducerende tiltag såsom afsvovlingsanlæg på forbrændingsanlæggene og brug af svovlfattigt brændstof, hvilket har ført til omkring 95% fald i de danske udledninger (Figur 4.4). Udledningerne i de øvrige EU-lande har også bidraget til faldet i luftkoncentrationerne for svovldioxid om end udledningerne her er faldet langsommere end i Danmark. I de seneste årtier har internationale tiltag til reduktion af udledningerne fra international skibsfart være en vigtig del af årsagen til det fortsatte fald i luftkoncentrationerne af svovldioxid.



Figur 4.3. Udviklingstendens for årsmiddelkoncentrationerne af svovldioxid. Fra 2000 til 2001 (stiplet streg) skifter målemetoden fra filterpack-opsamlere kombineret med kemisk analyse af opsamlede prøver til den nuværende metode baseret på gasmonitorer. Gasmonitorerne kan give målinger med kort tidsopløsning, men har til gengæld problemer med interferens fra kvælstofoxider, så værdierne skal anses som en øvre grænse. Endvidere er niveauerne i de seneste år så lave, at luftkoncentrationerne ligger tæt på gasmonitors detektionsgrænse. Målingerne på landbaggrundsmålestationer er fortsat baseret på filterpack-opsamlinger.



Figur 4.4. Udviklingen i luftkoncentrationer af svovldioxid på gademålestationer i København (venstre akse) sammenholdt med den relative udvikling i udledningerne af svovldioxid (højre akse, indekseret til 100 i 1990) (Nielsen et al., 2022; CEIP, 2023). Bemærk at udviklingstendensen er sammenstykket af målinger fra dels Jagtvej og dels H.C. Andersens Boulevard, hvilket naturligvis giver en vis usikkerhed på det samlede fald over hele perioden. Endvidere er der anvendt to forskellige målemetoder, hvor gasmonitorerne anvendt i perioden efter 2000 er behæftet med betydelig usikkerhed pga. de meget lave koncentrationsniveauer (se teksten til Figur 4.3).

5. Flygtige organiske forbindelser, VOC

De flygtige organiske forbindelser (Eng. volatile organic compounds, VOC) udgør en relativt omfattende gruppe af kemiske forbindelser, der er kendetegnet ved et højt damptryk, som gør, at de relativt let fordamper til atmosfæren. De flygtige organiske forbindelser påvirker helbredet på flere forskellige måder:

- Direkte effekter: Nogle flygtige organiske forbindelser har direkte helbredsskadelige effekter. Dette gælder for eksempel benzen, der er kræftfremkaldende.
- Bidrag til ozondannelse: Sammen med kvælstofoxiderne fører flygtige organiske forbindelser til dannelse af ozon, der har helbredsskadelige effekter (Kapitel 6).
- Bidrag til dannelse af sekundære organiske partikler: De kemiske reaktioner i atmosfæren kan omdanne de flygtige organiske forbindelser til partikler (sekundære organiske partikler), som har helbredsskadelige effekter (Kapitel 7).

De flygtige organiske forbindelser udledes fra en lang række menneskeskabte aktiviteter, hvor navnlig landbrug og anvendelse af opløsningsmidler og flydende brændstoffer spiller en stor rolle. Der er endvidere også en lang række naturlige kilder til de flygtige organiske forbindelser, herunder vegetation.

EU's luftkvalitetsdirektiv (EU, 2008) stiller krav om måling af benzen, og fastlægger en grænseværdi til beskyttelse af befolkningen mod helbredseffekterne som følge af langtidseksponering for benzen. Grænseværdien for benzen angiver, at årsmiddelværdien ikke må overskride $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for et kalenderår.

Benzen overvåges ved tre målestationer i København (gademålestationerne på H.C. Andersens Boulevard og Jagtvej) og ved bybaggrundsmålestationen i København (H.C. Ørsted Institutet). Grundet de lave koncentrationer åbner EU's luftkvalitetsdirektiv mulighed for at fastlægge luftkvaliteten ved hjælp af en såkaldt *objektiv estimering* (EU, 2008). Denne mulighed anvendes i forbindelse med vurdering af benzenkoncentrationerne i Aarhus og Odense.

EU's luftkvalitetsdirektiv angiver endvidere, at der skal foretages målinger af flygtige organiske forbindelser i relation til dannelsen af ozon. Derfor foretages målinger af 17 udvalgte flygtige organiske forbindelser ved bybaggrundsmålestationen i København (H.C. Ørsted Institutet).

5.1 Udledninger

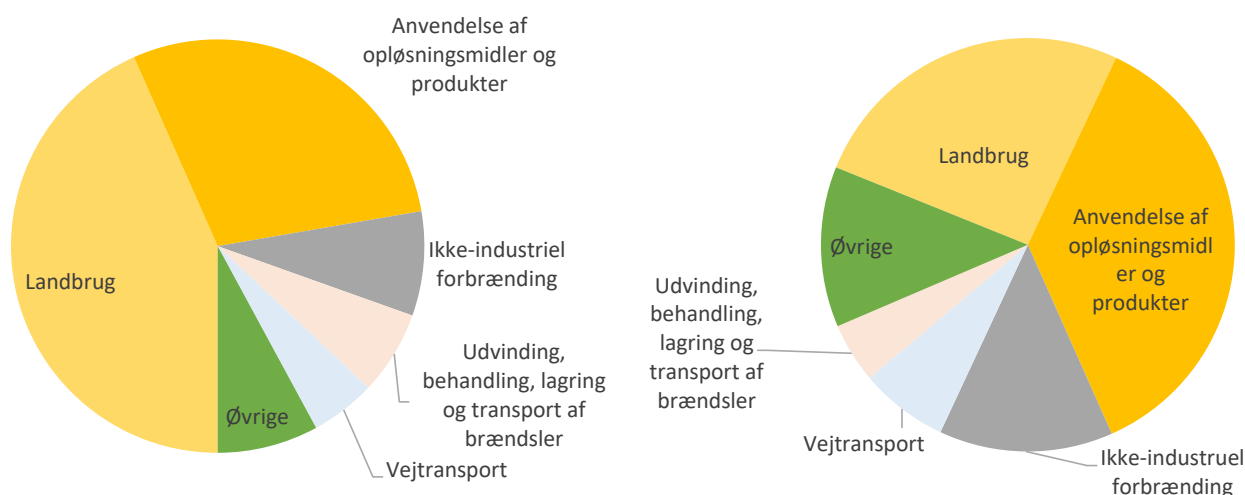
Opgørelser over udledningerne af flygtige organiske forbindelser omfatter som oftest ikke metan, selv om metan også hører under gruppen af flygtige organiske forbindelser, hvilket er fordi metan adskiller sig meget fra den øvrige gruppe af flygtige organiske forbindelser.

Udledningerne af flygtige organiske forbindelser bortset fra metan (NMVOC – non-methane volatile organic compounds) fra danske kilder er præget af mange kilder, hvoraf den største er landbrug – nærmere bestemt emissioner fra husdyrhold og gødningshåndtering (Figur 5.1 og Tabel 5.1; Nielsen et al.,

2021). Anvendelse af opløsningsmidler, ikke-industriel forbrænding (især fyring med træ og halm) og udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler er de vigtigste kilder ud over landbrug. Tidligere udgjorde vejtransport en stor del af udledningerne, men med indførelse af katalysatorer og strengere udledningsstandarder, så er bidraget faldet betydeligt.

De samlede udledninger af NMVOC er faldet med omkring 51 % siden begyndelsen af 1990'erne (Figur 5.2; Nielsen et al., 2021). Langt størstedelen af faldet i udledninger skyldes reduktionen i vejtransport.

Figur 5.1 viser en sammenligning mellem kilderne til udledninger af flygtige organiske forbindelser i Danmark og EU-27. Det er de samme fem kilder, som er vigtigst, men landbrug spiller langt den vigtigste rolle i Danmark, mens anvendelse af opløsningsmidler og produkter er vigtigst i EU-27. Faldet i udledningerne følger stort set samme billede om end udledningerne er faldet lidt langsommere i Danmark end i EU-27 (Figur 5.2).

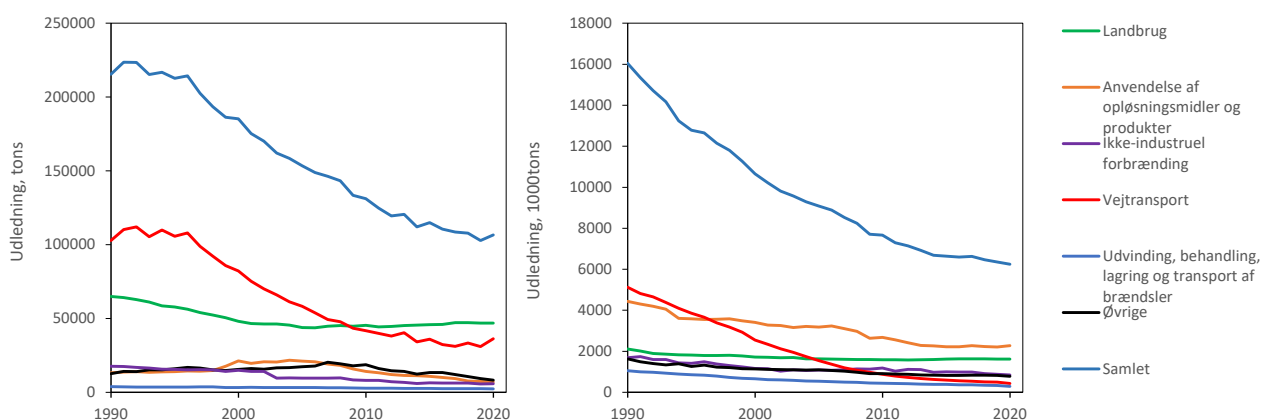


Figur 5.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af flygtige organiske forbindelser i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2020. Figurene viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2022, CEIP, 2023).

Tabel 5.1. Kilderne til de menneskabte udledninger af flygtige organiske forbindelser i Danmark i 2020 (Nielsen et al., 2022). Kilderne er opgjort i 10 hovedkategorier med en yderligere underopdeling for "Ikke-industriel forbrænding" og "Vejtransport". Opdelingen er baseret på SNAP-koder (Selected Nomenclature for Air Pollution).

Kategori	SNAP-kode	Udledninger 2020	
		Tons	%
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	862	1
Ikke-industriel forbrænding	2	8695	8
<i>Handel og service</i>	201	139	0
<i>Husholdninger</i>	202	7324	7
<i>Land, skovbrug og akvakultur</i>	203	1232	1
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	645	1
Industrielle processer	4	2352	2
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	5	6984	7
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	30832	29
Vejtransport	7	5434	5
<i>Udstødning</i>	701-706	5434	5
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	0	0
Andre mobile kilder *	8	3894	4
Affald	9	668	1
Landbrug	3b,d,f-i	46219	43
Samlet		106584	100

* Data inkluderer national søfart, al flyvning under 3000 fod, togtrafik, militær, fritidsfartøjer, fiskeri, og arbejdsredskaber indenfor landbrug, skovbrug, industri, handel/service og husholdninger.



Figur 5.2. Udviklingen i udledningerne af flygtige organiske forbindelser i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) siden 1990 (Nielsen et al., 2022; CEIP, 2023).

5.2 Status for luftkvalitet

Tabel 5.2 angiver status for årsmiddelværdierne af benzen, toluen, ethylbenzen og xylenerne i 2021. EU's luftkvalitetsdirektiv angiver kun en grænseværdi for benzen (EU, 2008). Der er ingen overskridelse af grænseværdien og selv de højeste årsmiddelværdier ved gademålestationerne ligger på omkring en tiendedel af grænseværdien.

Tabel 5.2. Årsmiddelværdier for benzen, toluen, ethylbenzen og xylenerne i 2021 samt grænseværdi for benzen (EU, 2008).

	Benzen µg/m ³	Toluen µg/m ³	Ethylbenzen µg/m ³	m/p-xilen µg/m ³	o-xilen µg/m ³
Grænseværdi	5				
<i>Gade</i>					
København, H.C. Andersens Boulevard	0,52	1,14	0,19	0,67	0,23
København, Jagtvej	0,52	1,20	0,20	0,71	0,24
<i>Bybaggrund</i>					
København, H.C. Ørsted Institutet	0,37	0,79	0,11	0,29	0,14

Benzen måles ikke direkte i Aarhus og Odense, men i stedet anvendes objektiv estimering til at vurdere årsmiddelkoncentrationerne. Den objektive estimering er baseret på følgende korrelation mellem årsmiddelkoncentrationen af benzen og carbonmonoxid (Ellermann et al., 2011):

$$\text{Benzen} = 0,0044 \cdot \text{carbonmonoxid} - 0,37$$

hvor benzen og carbonmonoxid angives i µg/m³. Ud fra denne sammenhæng og årsmiddelkoncentrationerne af carbonmonoxid estimeres årsmiddelkoncentrationerne af benzen til omkring 0,5-0,8 µg/m³. Niveauet er dermed på niveau med København, idet der skal tages hensyn til, at det objektive estimat er behæftet med stor usikkerhed.

Tabel 5.3 præsenterer årsmiddelkoncentrationerne for de udvalgte flygtige organiske forbindelser, som overvåges i forbindelse med måleprogrammet.

Tabel 5.3. Årsmiddelkoncentrationer for udvalgte flygtige organiske forbindelser i 2021 målt ved bybaggrundsmålestationen på H.C. Ørsted Institutet. Til sammenligning angives også årsmiddelkoncentrationerne for 2010 samt faldet i årsmiddelkoncentrationerne fra 2010 til 2021.

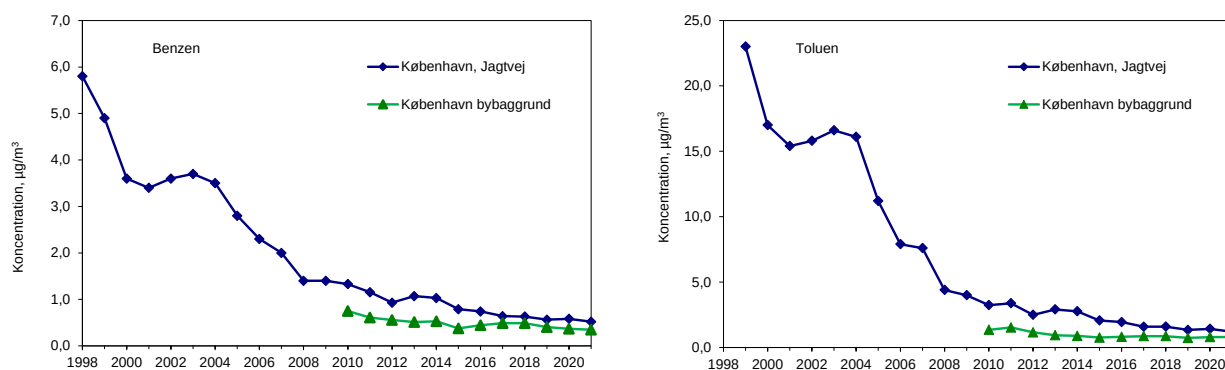
Kemisk forbindelse	Årsmiddelkoncentration, µg/m³		Ændring siden 2010
	2010	2021	%
1-Penten	0,04	0,03	-20
n-Pentan	0,53	0,40	-24
trans-2-Penten	0,02	0,01	-58
Isopren	0,03	0,05	60
2-Methylpentan	0,31	0,28	-10
n-Hexan	0,19	0,11	-43
Benzen	0,75	0,35	-54
n-Heptan	0,28	0,05	-80
2,2,4-trimethylpentan/ isooktan	0,10	0,22	120
Toluen	1,36	0,81	-40
n-Oktan	0,08	0,03	-60
Ethylbenzen	0,28	0,13	-54
m- og p-Xylen	0,78	0,31	-60
o-Xylen	0,41	0,20	-52
1,3,5-trimethylbenzen	0,10	Ikke analyseret	-90*
1,2,4-trimethylbenzen	0,34	0,10	-69
1,2,3-trimethylbenzen	0,09	0,03	-71
Samlet	5,68	3,35	-41

*Da 1,3,5-trimethylbenzen ikke er analyseret i 2021, er faldet baseret på årsmiddelkoncentrationen for 2018.

5.3 Udviklingstendens

Figur 5.3 viser udviklingstendensen for årsmiddelværdierne af benzen og toluen ved gademålestationen (Jagtvej) og bybaggrundsmålestationen i København. Det store fald i koncentrationer af benzen (omkring 90%) og toluen (omkring 95%) skyldes faldet i de danske udledninger, hvor der navnlig er sket et betydeligt fald i udledningerne fra vejtransport som følge af renere brændstoffer og anvendelse af katalysatorer i køretøjerne. Der ses også fald ved bybaggrundsmålestationen, om end dette fald ikke er helt så markant som ved gademålestationen.

Tabel 5.3 angiver også ændringerne for de øvrige flygtige organiske forbindelser siden opstarten af målingerne i 2010. For langt de fleste af forbindelserne ses markante fald i koncentrationerne, hvilket er i overensstemmelse med det generelle fald i udledningerne af de flygtige organiske forbindelser (Figur 5.2). For nogle få af de flygtige organiske forbindelser ses uændrede eller stigende koncentrationer. Dette gælder for eksempel for isopren, som er en forbindelse, der primært kommer fra vegetation og dermed ikke reduceres i forbindelse med alle tiltagene til reduktion af de menneskeskabte udledninger af flygtige organiske forbindelser.



Figur 5.3. Udviklingstendens for benzen (venstre) og toluen (højre) ved gademålestationen på Jagtvej og bybaggrundsmålestationen i København (H.C. Ørsted Instituttet).

6. Ozon, O₃

Ozon er en giftig gas, som ved jordoverfladen giver anledning til betydelige negative helbredseffekter. Der sker ingen udledning af ozon fra menneskeskabte kilder, men til gengæld dannes ozon via kemiske reaktioner i den nedre del af atmosfæren. Ozondannelsen foregår ved en serie af kemiske reaktioner, som involverer kvælstofoxiderne (Kapitel 2) og de flygtige organiske forbindelser i atmosfæren (Kapitel 5). De kemiske reaktioner kræver sollys og høj lufttemperatur, for at der kan dannes betydelige mængder ozon. Dette forårsager høje ozonkoncentrationer i de sydlige dele af Europa og denne ozon transporteres med luftmasserne op til Danmark. I Danmark sker der kun en ubetydelig dannelse af ozon, da temperaturen er relativ lav set i forhold til det sydlige Europa.

Ozon er omfattet af EU's luftkvalitetsdirektiv (EU, 2008), hvor der er fastlagt en såkaldt målværdi (en slags grænseværdi) og en langsigtet målsætning til beskyttelse mod helbredseffekter fra korttidsseksponering for ozon:

- Målværdien angiver, at den daglige maksimale 8-timersmiddelværdi ikke må overskride 120 µg/m³ mere end 25 gange i kalenderåret set som gennemsnit over de seneste tre år.
- Den langsigtede målsætning angiver, at den maksimale 8-timersmiddelværdi ikke må overskride 120 µg/m³ i løbet af kalenderåret.

Den langsigtede målsætning er imidlertid ikke trådt i kraft endnu, og der er ikke fastlagt et tidspunkt for ikrafttrædelse af målsætningen (EU, 2008).

EU's luftkvalitetsdirektiv angiver endvidere, at befolkningen skal informeres, når timemiddelkoncentrationen overskrider 180 µg/m³. Ved overskridelse skal befolkningen informeres om, at ozonniveauerne er høje, og at de høje koncentrationer vil kunne give anledning til mindre gener.

Den højeste eksponering for ozon ses i bybaggrund eller landbaggrund, mens koncentrationerne på gademålestationerne er langt mindre. Det skyldes, at udledninger af kvælstofoxider fra navnlig trafik nedbryder ozon lokalt i byområder. Måleprogrammet for 2021 for ozon har derfor hovedvægt på bybaggrundsmålestationerne (4 stk.) og landbaggrundsmålestationerne (3 stk.), mens der på gadeniveau kun måles på én station, H.C. Andersens Boulevard.

6.1 Status for luftkvalitet

Tabel 6.1 viser resultaterne for målingerne af årsmiddelkoncentrationerne for ozon. Her ses tydeligt, at årsmiddelkoncentrationerne ligger væsentligt lavere ved gademålestationen end i bybaggrund og landbaggrund. Dette skyldes den kemiske reaktion med kvælstofmonooxid, som navnlig fører til nedbrydning af ozon i byerne, hvor udledningerne af kvælstofoxider fra vejtrafikken er høje. Til gengæld er der kun en meget lille forskel mellem resultaterne fra by- og landbaggrundsmålestationerne, hvilket kan forklares med, at størstedelen af ozon langtransporteres til Danmark fra det sydlige Europa, og under transporten sker der en udjævning af eventuelle geografiske variationer i koncentrationerne.

Til gengæld blev EU's langsigtede målsætning overskredet på alle baggrundsmålestationer i 2021 (Tabel 6.1). Denne målsætning er endnu ikke trådt i kraft, og det vides ikke, hvornår det sker.

EU's informationstærskel for timemiddelværdien af ozon på 180 µg/m³ (EU, 2008) blev ikke overskredet i 2021.

Tabel 6.1. Årsmiddelværdier for ozon i 2021 og en række andre parametre til vurdering af overholdelse af de i EU fastlagte målsætninger for ozon (EU, 2008). For ozon er der en gældende målværdi (vurderes som gennemsnit af de seneste tre kalenderår), en langsigtet målsætning, som endnu ikke er trådt i kraft og en informationstærskel, som angiver grænsen for, hvornår befolkningen skal informeres om høje ozonniveauer.

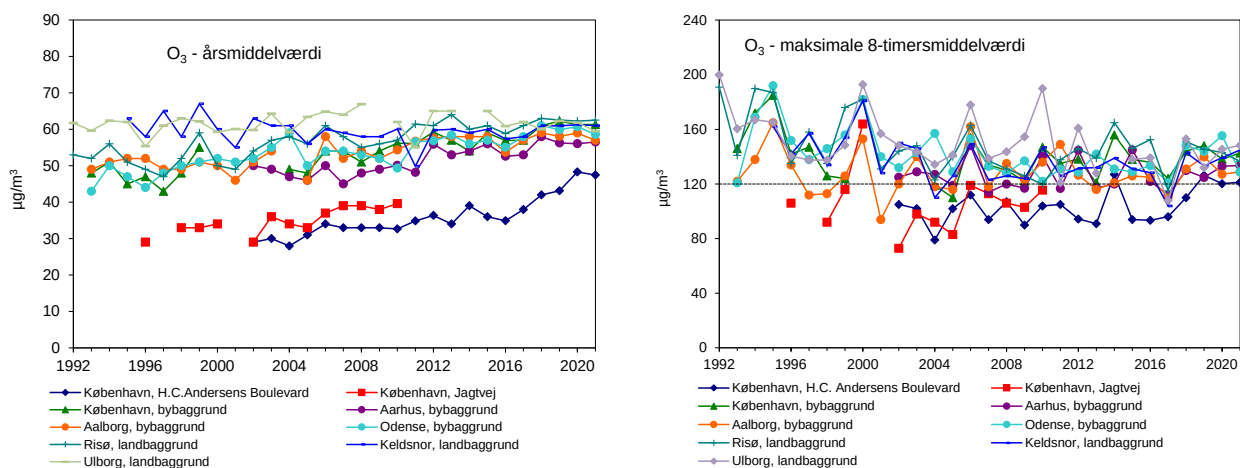
	Årsmiddel	Antal dage med den maksimale 8-timersmiddelværdi over 120 µg/m ³	Maksimum 8-timersmiddelværdi	Højeste timemiddelværdi
	µg/m ³	Antal dage	µg/m ³	µg/m ³
Målværdi		25*		
Langsigtet målsætning			120	
Informationstærskel				180
<i>Gade</i>				
København, H.C. Andersens Boulevard	47	1	121	131
<i>Bybaggrund</i>				
København	61	6	143	158
Odense	59	3	129	136
Aarhus	57	1	134	143
Aalborg	57	2	129	142
<i>Landbaggrund</i>				
Keldsnor	61	2	145	155
Risø	63	5	137	146
Ulborg	59	2	148	168

* Målværdi gælder som gennemsnit for de seneste tre kalenderår.

6.2 Udviklingstendens

Figur 6.1 viser udviklingstendens for årsmiddelværdien og den maksimale 8-timersmiddelværdi for ozon. For landbaggrundsstationerne ses uændrede til svagt stigende årsmiddelværdier gennem hele måleperioden. Der ses også en svag stigning ved bybaggrundsmålestationerne, og en tydelig stigning ved gademålestationerne. Dette billede hænger sammen med, at der navnlig i byerne er sket et stort fald i udledningerne af kvælstofoxider. Det store fald i udledningen kvælstofoxider har reduceret omdannelsen af ozon lokalt i byerne, hvilket resulterer i en stigning i koncentrationerne af ozon.

For de maksimale 8-timersmiddelværdier er der i 1990'erne og begyndelsen af 2000'erne et fald i koncentrationerne ved baggrundsmålestationerne. Siden midten af 2000'erne har værdierne ligget på omtrent samme niveau. Siden 1990'erne er der dermed sket et fald i antallet af episoder med høje koncentrationsniveauer af ozon.



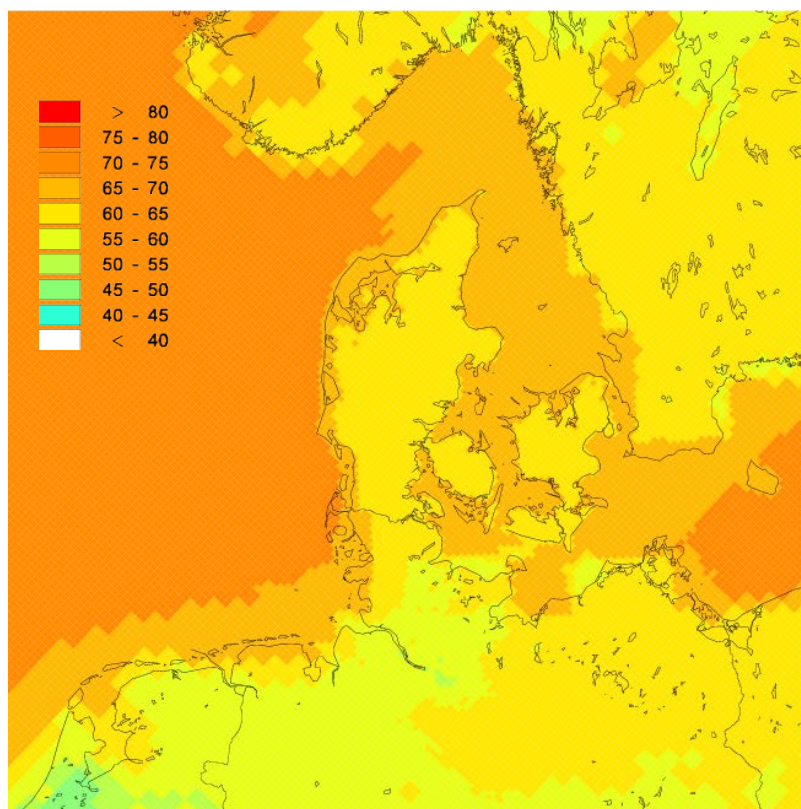
Figur 6.1. Årsmiddelværdier (venstre) og den maksimale 8-timersmiddelværdi (højre) for ozon. Den stiplede linje i den højre figur angiver EU's langsigtede målsætning, som endnu ikke er trådt i kraft (EU, 2008).

6.3 Modelberegninger

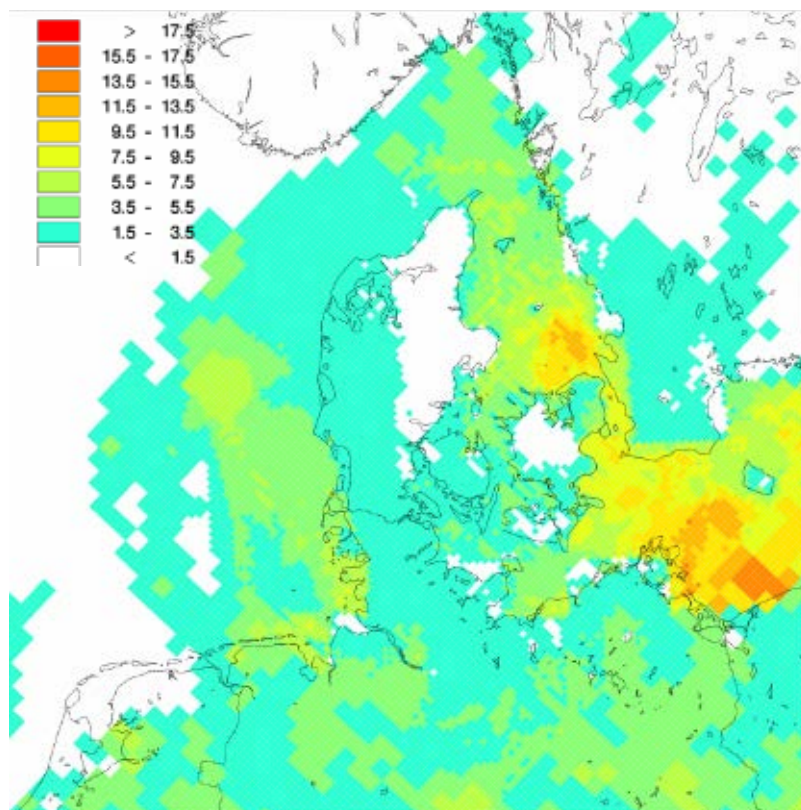
Modelberegninger med regionalskala-modellen DEHM viser, at den geografiske spredning af ozon er lille, og at årsmiddelværdien ligger på omkring 60-65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figur 6.2). Dette er fint i overensstemmelse med resultaterne fra målingerne (Tabel 6.1). Årsmiddelkoncentrationen ligger en smule højere ved kysterne, hvilket skyldes, at afsætningen af ozon på vandoverflader er meget lille sammenlignet med afsætning til landoverflader. Når ozon transporteres til Danmark over vandområder, er der derfor en meget lille fjernelse af ozon fra luften. Herefter transporteres luften videre ind over danske landområder, hvor fjernelsen af ozon øges og koncentrationerne falder.

EU's målværdi for ozon angiver, at den daglige maksimale 8-timersmiddelværdi ikke må overskride 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mere end 25 gange i kalenderåret set som gennemsnit over de seneste tre år. Figur 6.3 viser den modelberegnete geografiske variation i antallet af dage, hvor den maksimale 8-timersmiddelværdi overskrider 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2021. Der er ingen områder, hvor EU's grænse på 25 dage er overskredet.

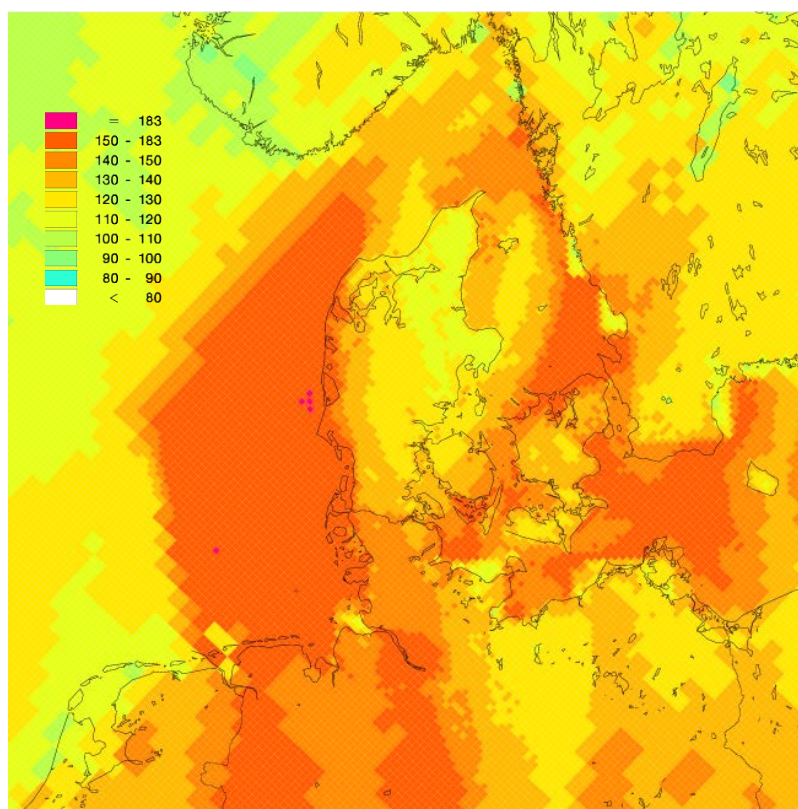
EU's langsigtede målsætning angiver, at den maksimale 8-timersmiddelværdi ikke må overskride 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i løbet af kalenderåret (EU, 2008). Figur 6.4 viser den geografisk variation for den maksimale 8-timersmiddelværdi. Her ses, at EU's langsigtede målsætning er overskredet i den største del af landet, hvilket er i overensstemmelse med resultaterne fra målingerne (Tabel 6.1). Kun i dele af det nordøstlige Jylland ligger niveauet lige under 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Den langsigtede målsætning er endnu ikke trådt i kraft, og det vides ikke, hvornår det sker.



Figur 6.2. Årsmiddelkoncentrationer for ozon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) i 2021 beregnet med regionalskalamodellen DEHM. Figuren viser gennemsnitlige koncentrationer for gitterceller på 6 km x 6 km.



Figur 6.3. Antallet af dage, hvor 8-timersmiddelværdien overskrider $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2021 beregnet med regionalskalamodellen DEHM. Figuren viser gennemsnitlige værdier for gitterceller på 6 km x 6 km.



Figur 6.4. Den maksimale 8-timersmiddelværdi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) i 2021 beregnet med regional-skalamodellen DEHM. Figuren viser gennemsnitlige værdier for gitterceller på 6 km x 6 km.

7. Luftbårne partikler

De luftbårne partikler anses for at være ansvarlige for langt hovedparten af de negative helbredseffekter fra luftforureningen. Partikelforureningen består af mange hundrede forskellige slags partikler med forskellige fysiske og kemiske egenskaber. Derfor er der også mange kilder til den luftbårne partikelforurening, som både udledes direkte fra menneskeskabte og naturlige kilder, og som også dannes i stort omfang via de kemiske reaktioner i luften. Typisk inddeles partikler i luften i to grupper, hvoraf den ene gruppe benævnes direkte udledte partikler eller primære partikler (PPM) og den anden gruppe betegnes sekundære partikler.

Dette kapitel omhandler resultaterne fra overvågning af selve massen og antallet af partikler i luften, mens de følgende kapitler præsenterer resultaterne fra overvågningen af forskellige kemiske komponenter (for eksempel tungmetaller og elementært kulstof) i den luftbårne partikelforurening.

Det danske overvågningsprogram er i dag baseret på overvågning af tre fraktioner af partikelforureningen:

- **Partikelantal:** Antal partikler per cm^3 med diameter mellem 41 og 478/550 nm og mellem 11 og 478/550 nm (forklares yderligere i afsnit 7.2). Denne partikelfraktion bestemmes ved at tælle dem. På trods af det store antal partikler i denne fraktion, er størrelsen af den enkelte partikel så lille, at den samlede masse er ubetydelig. Partikelantal omtales ofte som mængden af ultrafine partikler, hvilket strengt taget ikke er helt korrekt, da de ultrafine partikler kun dækker partikler med diameter op til 100 nm. Partikelantallet i hele 11 – 550 nm-intervallet er dog skønsmæssigt kun omkring 15-25% højere end antallet af ultrafine partikler i det korrekte størrelsesinterval. Forskellen afhænger af lokalitet (landbaggrund, bybaggrund, gade).
- **PM_{2,5}:** Massen af fine partikler med diameter mindre end 2,5 μm . De ultrafine partikler er altså en delmængde af PM_{2,5}, men massen af de ultrafine partikler er meget lille, så derfor udgør de ultrafine partikler en ubetydelig andel af PM_{2,5}.
- **PM₁₀:** Massen af partikler med diameter mindre end 10 μm . PM_{2,5} er en delmængde af PM₁₀. PM₁₀ kan i visse sammenhænge med fordel opdeles i de fine partikler (PM_{2,5}) og de grove partikler (PM₁₀ fratrukket PM_{2,5}).

EU's luftkvalitetsdirektiv (EU, 2008) omfatter PM_{2,5} og PM₁₀ og angiver tre grænseværdier for disse partikelfraktioner:

- For at begrænse langtidseksponeringen for PM_{2,5} er der fastlagt en grænseværdi, som angiver, at årsmiddelværdien af PM_{2,5} ikke må overstige 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- For at begrænse langtidseksponeringen for PM₁₀ er der fastlagt en grænseværdi, som angiver, at årsmiddelværdien af PM₁₀ ikke må overstige 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- For PM₁₀ er der endvidere også fastsat en korttidsgrænseværdi, som angiver, at døgnmiddelværdien for PM₁₀ ikke må overskride 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mere end 35 gange i et kalenderår.

EU's luftkvalitetsdirektiv har endvidere fastlagt et nationalt reduktionsmål for at begrænse de skadelige virkninger af luftforurening på menneskers sundhed (EU, 2008). Reduktionsmålet er fastlagt på basis af en "indikator for gennemsnitlig eksponering" (på engelsk Average Exposure Indicator, AEI), som beregnes ud fra den gennemsnitlige bybaggrundskoncentration i Danmark af $PM_{2,5}$ taget som gennemsnit for en treårig periode. For Danmark betyder reduktionsmålet, at AEI skulle falde med 15% fra 2010 til 2020. Reduktionsmålet beskrives yderligere i afsnit 7.3.

Endeligt indeholder EU's luftkvalitetsdirektiv også en forpligtelse til, at eksponeringskoncentrationen (AEI) ikke må overskride $20 \mu g/m^3$ for et kalenderår.

Overvågningsprogrammet omfatter en relativt omfattende overvågning af $PM_{2,5}$ og PM_{10} . I 2021 måles de to parametre samtidigt på fem målestationer (København gade - hhv. H.C. Andersens Boulevard og Jagtvej, Aarhus gade, København bybaggrund og landbaggrund ved Risø), mens der måles $PM_{2,5}$ på yderligere tre målestationer (Aarhus og Aalborg bybaggrund, Hvidovre forstad), og PM_{10} på yderligere to målestationer (Keldsør og Odense gade).

Målinger af partikelantal er ikke omfattet af EU's luftkvalitetsdirektiv, og der findes ingen miljømålsætninger for, hvor stort partikelantallet må være. Der er imidlertid et stort nationalt behov for viden omkring niveauer og udviklingstendens for partikelantallet. Derfor måles partikelantal på tre målestationer i hovedstadsområdet (H.C. Andersens Boulevard, København bybaggrund og Hvidovre forstad) og i landlig baggrund ved Risø.

7.1 Udledninger

I det følgende præsenteres resultaterne for opgørelse af de direkte udledninger af luftbårne partikler i Danmark. De direkte udledninger udgør kun en lille del af den målte partikelforurening i Danmark, da der, som det indledningsvist blev nævnt, også er naturlige kilder til partikelforureningen, og der dannes mange partikler via de kemiske reaktioner i luften. Derfor er der stor forskel på sammensætningen af kilderne til de direkte udledte partikler og kilderne til den samlede målte partikelforurening i luften.

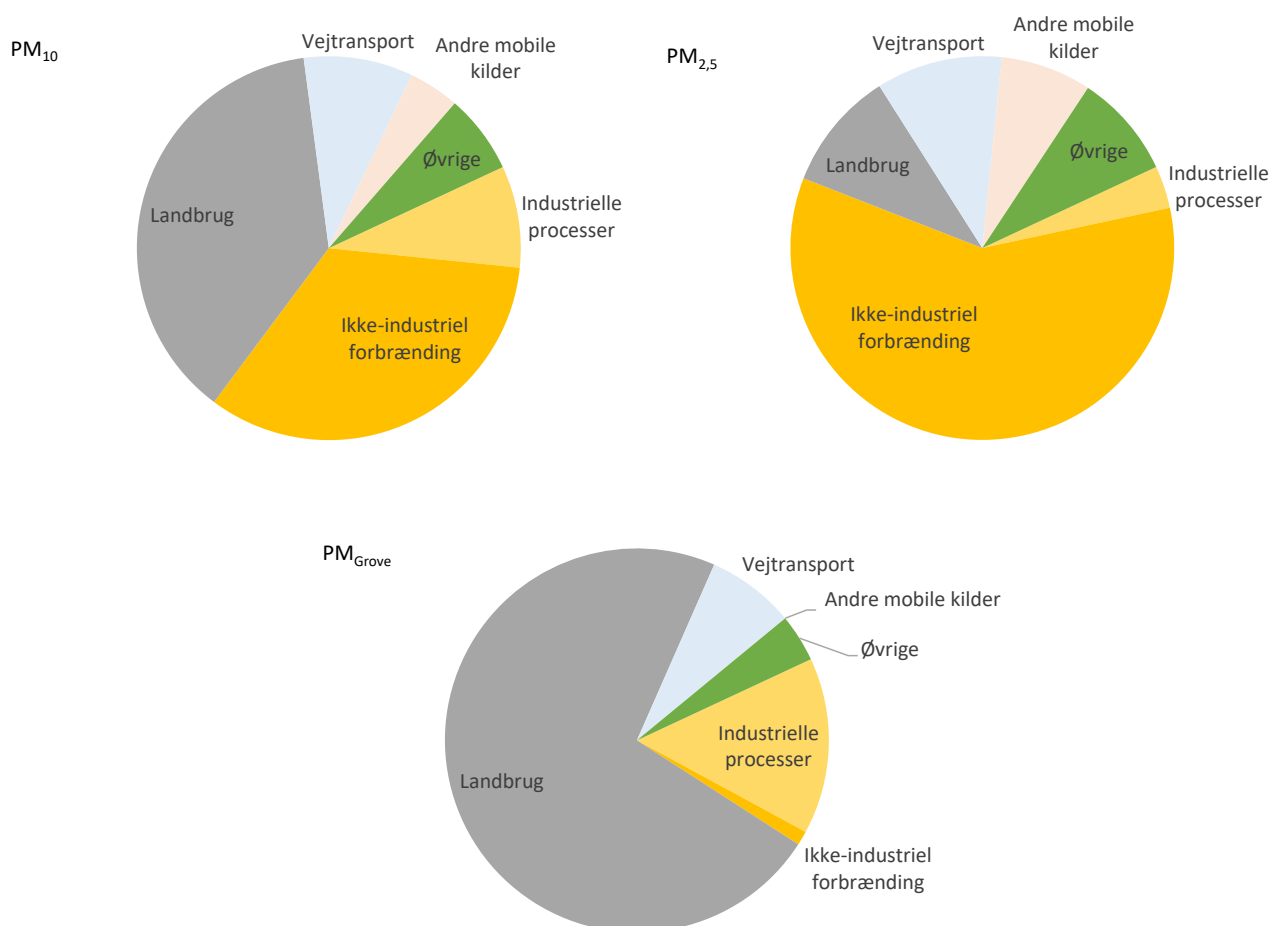
Der er endvidere også stor forskel på kilderne til de forskellige størrelsesfraktioner af partikler. De fine partikler ($PM_{2,5}$) udgør omkring 56% af de udledte partikler med diameter mindre end $10 \mu m$ (PM_{10}), mens de grovere partikler med diameter mellem 2,5 og $10 \mu m$ (PM_{Grove}) udgør omkring 44% (Tabel 7.1). PM_{Grove} er beregnet ud fra forskellen mellem PM_{10} og $PM_{2,5}$.

De fine partikler ($PM_{2,5}$) udledes i langt overvejende grad fra ikke-industriel forbrænding (hovedsageligt fra anvendelse af brænde til boligopvarmning, Figur 7.1; Nielsen et al., 2022). I 2020 var omkring 59% af udledningerne fra ikke-industriel forbrænding, og 52% kom alene fra boligopvarmning. Herefter kommer udledningerne fra vejtransport (11%) og andre mobile kilder (8%).

For de grove partikler (PM_{grove}) ses en meget anderledes kildesammensætning, hvor støv fra landbruget i 2020 stod for hovedparten (omkring 72 %), mens industrielle processer var ansvarlig for omkring 15% og vejtransport for omkring 7% (Tabel 7.1). Årsagen til det store bidrag fra industrielle processer er blandt andet, at anlæggelse af veje hører under denne kategori ifølge de

europæiske retningslinjer for emissionsopgørelser (EEA, 2019). Det skal endvidere bemærkes, at det er vanskeligt at opgøre udledningerne fra landbrug, så disse tal er behæftet med stor usikkerhed.

De direkte udledninger af PM_{10} er faldet med omkring 37% siden 1990 (Figur 7.2). Dette fald er hovedsageligt opnået via et fald i udledningerne af de fine partikler (omkring 48%), mens udledningerne af de grove partikler er faldet væsentligt mindre (omkring 14% fald). Årsagen til den markante top for de grove partikler i 2008 er, at der i 2008 blev anlagt usædvanligt meget ny vej (baseret på informationer fra Danmarks Statistik), hvilket kategoriseres under industrielle processer.



Figur 7.1. Kilderne til de direkte udledninger af partikelforurening i Danmark i 2020 (Nielsen et al., 2022). Øverst til venstre er PM_{10} , øverst til højre er $PM_{2,5}$ og nederst i midten er PM_{Grove} (partikler med diameter mellem 2,5 og 10 μm). PM_{Grove} er beregnet ud fra forskellen mellem PM_{10} og $PM_{2,5}$. Figurerne viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige".

Faldet i udledningerne af fine partikler (Figur 7.2) skyldes relativt store fald i udledningerne fra vejtransport (omkring 73%) og andre mobile kilder (omkring 78%), men der er også gennem de seneste år sket et betydeligt fald i udledninger fra ikke-industriel forbrænding (omkring 33%). Emissionsreduktionerne for vejtransport og andre mobile kilder er især opnået ved indførelse af partikelfiltre. Udledningerne fra ikke-industriel forbrænding var på sit højeste i 2008, men siden da er der sket en markant reduktion i udledningerne fra ikke-industriel forbrænding, hovedsageligt som følge af forbedret forbrænding i forbindelse med boligopvarmning og igennem de seneste tre år også som følge af fald i brændeforbrug (Nielsen et al., 2022).

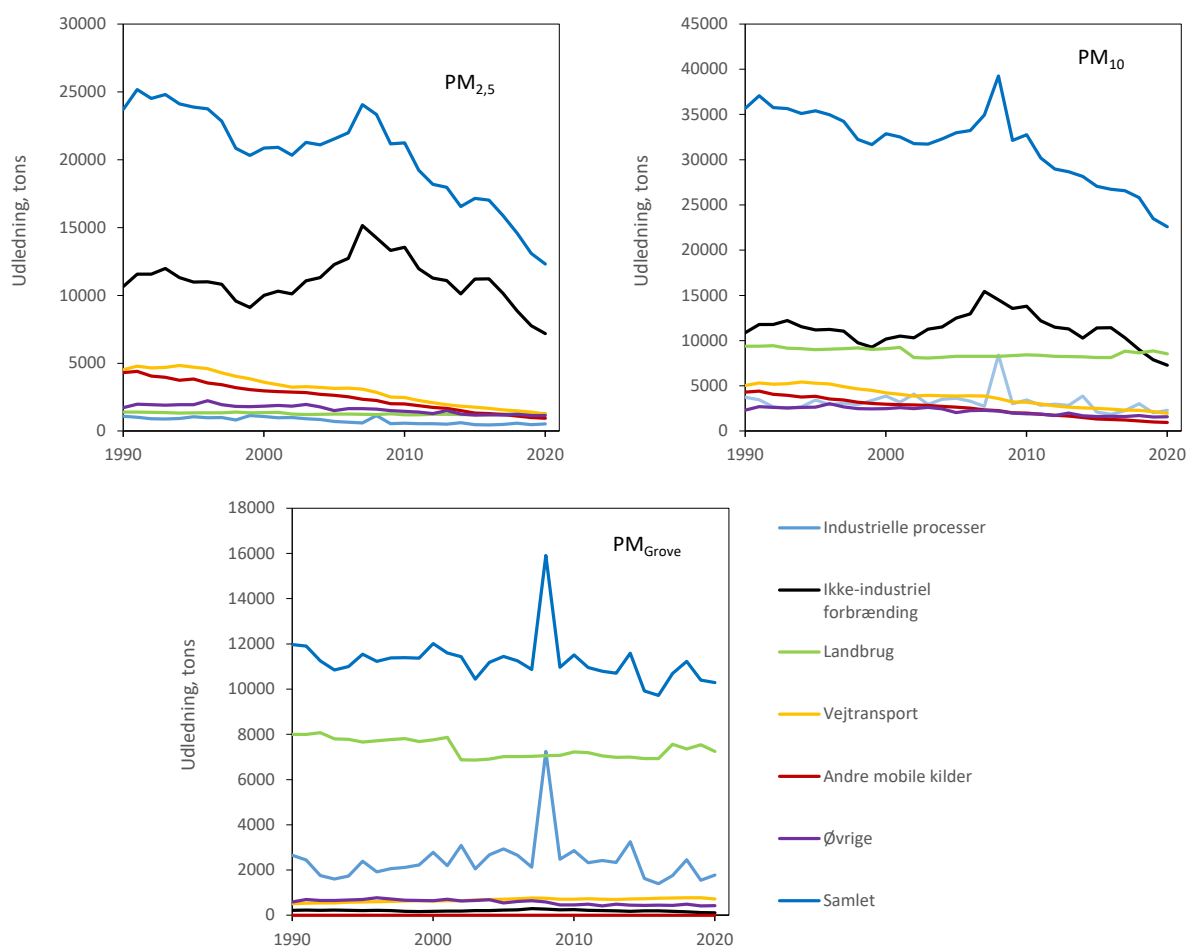
Det lille fald, som ses for udledningerne af de grove partikler (Figur 7.2), skyldes hovedsageligt et mindre fald i udledningerne fra landbrug, men også fald i de øvrige kilder. Til gengæld er det værd at bemærke, at der ses en stigning i udledningerne fra vejtransport. De grove partikler fra vejtransport kommer fra dæk-, bremse- og vejslid, som det er vanskeligt at reducere via tekniske tiltag. Den stigende vejtransport har derfor givet øgede udledninger.

For EU-27 ses i store træk et tilsvarende mønster i kildesammensætningen og udviklingstendensen (CEIP, 2023).

Tabel 7.1. Kilderne til de direkte udledninger af partikler i Danmark i 2020 (Nielsen et al., 2022). Partikeludledningen angives for PM₁₀, PM_{2,5} og PM_{Grove} (partikler med diameter mellem 2,5 og 10 µm). PM_{Grove} er beregnet ud fra forskellen mellem PM₁₀ og PM_{2,5}. Kilderne er opgjort i 10 hovedkategorier med en yderligere underopdeling for "Ikke-industriel forbrænding" og "Vejtransport". Opdelingen er baseret på SNAP-koder (Selected Nomenclature for Air Pollution)

Kategori	SNAP-kode	PM ₁₀		PM _{2,5}		PM _{Grove}	
		Tons	%	Tons	%	Tons	%
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	580	2	459	4	121	1
Ikke-industriel forbrænding	2	7889	34	7765	59	124	1
<i>Handel og service</i>	201	98	0	94	1	5	0
<i>Husholdninger</i>	202	6910	29	6794	52	116	1
<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	203	881	4	878	7	3	0
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	168	1	112	1	56	1
Industrielle processer	4	2014	9	468	4	1546	15
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	5	31	0	8	0	23	0
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	472	2	254	2	218	2
Vejtransport	7	2164	9	1393	11	772	7
<i>Udstødning</i>	701-706	435	2	435	3	0	0
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	1729	7	957	7	772	7
Andre mobile kilder*	8	1004	4	1003	8	2	0
Affald	9	315	1	315	2	0	0
Landbrug	3b,d,f-i	8858	38	1319	10	7539	72
Samlet		23496	100	13096	100	10400	100

* Data inkluderer national søfart, al flyvning under 3000 fod, togtrafik, militær, fritidsfartøjer, fiskeri, og arbejdsredskaber inden for landbrug, skovbrug, industri, handel/service og husholdninger.



Figur 7.2. Udviklingen i de direkte udledninger af partikelforurening i Danmark til og med 2019 (Nielsen et al., 2022). Øverst til højre er PM_{10} , øverst til venstre er $PM_{2,5}$ og nederst i midten er PM_{Grove} (partikler med diameter mellem 2,5 og 10 μm). PM_{Grove} er beregnet ud fra forskellen mellem PM_{10} og $PM_{2,5}$.

7.2 Status for luftkvalitet

Af tabel 7.2 fremgår det, at niveauerne for årsmiddelværdierne i forhold til grænseværdierne ved gademålestationerne for $PM_{2,5}$ ligger på 35-40% og for PM_{10} på 40-60%. Antallet af dage, hvor døgnmiddelværdien overskrider 50 $\mu g/m^3$, ligger også betydeligt under grænseværdien. Der var derfor ingen overskridelse af grænseværdierne for partikelforureningen i 2021 ved nogen af målestationerne.

Måleprogrammet omfatter endvidere målinger af partikelantal, som er en parameter, der angiver den luftbårne forurening med partikler i nanostørrelse. Som allerede beskrevet er disse partikler så små, at deres masse er meget lille, og derfor måles de ved tælling. Måleresultaterne, der præsenteres i denne rapport, dækker partikler i størrelsen af 41 til 478/550 nm og i hele området fra 11 til 478/550 nm. I den seneste årsrapport indgik ikke partikler med diameter mindre end 41 nm grundet tekniske problemer på de nyligt erhvervede instrumenter. Denne fejl blev rettet i begyndelsen af februar 2020, og det har derfor igen været muligt at inkludere partiklerne under 41 nm. Årsagen til angivelsen af to øvre grænser er, at de gamle og nyere erhvervede instrumenter har lidt forskelligt måleområde. I praksis giver det dog kun anledning til en undseelig forskel, da antallet af partikler mellem 478 og 550 nm er ubetydelig i denne sammenhæng. Yderligere detaljer kan findes i Ellermann et al. (2020).

For partikler i området fra 11 til 478/550 nm varierer partikelantallet fra omkring 9.200 partikler per cm^3 på gademålestationen og ned til omkring 2.600 partikler per cm^3 på landbaggrundsmålestationen (tabel 7.2). For partikler i området fra 41 til 478/550 nm varierer partikelantal fra 2.800 til 1.400 partikler per cm^3 . De helt små partikler mellem 10 og 41 nm udgør dermed størstedelen af partiklerne og ved gademålestationen udgør disse omkring 70% af partiklerne, hvilket skyldes partikeludledningerne fra vejtrafikken. Der er ingen grænseværdier at sammenligne disse værdier med.

Tabel 7.2. Resultater for 2021 og grænseværdier for $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} og partikelantal. For $\text{PM}_{2,5}$ og PM_{10} angives årsmiddelværdien og de tilhørende grænseværdier fra EU's luftkvalitetsdirektiv (EU, 2008). For PM_{10} er der endvidere en grænseværdi for korttidseksponering for PM_{10} , som angiver, at døgnmiddelværdien for PM_{10} ikke må overskride 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mere end 35 gange i et kalenderår (EU, 2008). Til sammenligning med korttidsgrænseværdien angives antallet af dage med overskridelse af 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Endelig angives årsmiddelværdien for antallet af partikler med diameter i intervallerne 11 - 478/550 nm og 41 - 478/550 nm. Der er ingen grænseværdi for partikelantal. Grænseværdier og måleresultater er angivet ved ambient tryk og temperatur.

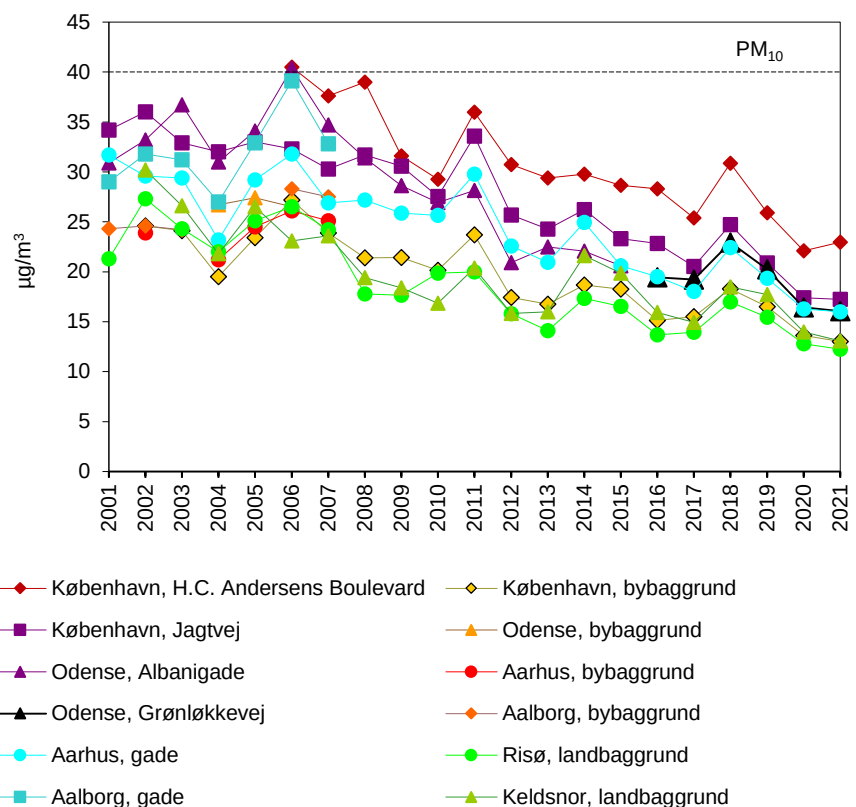
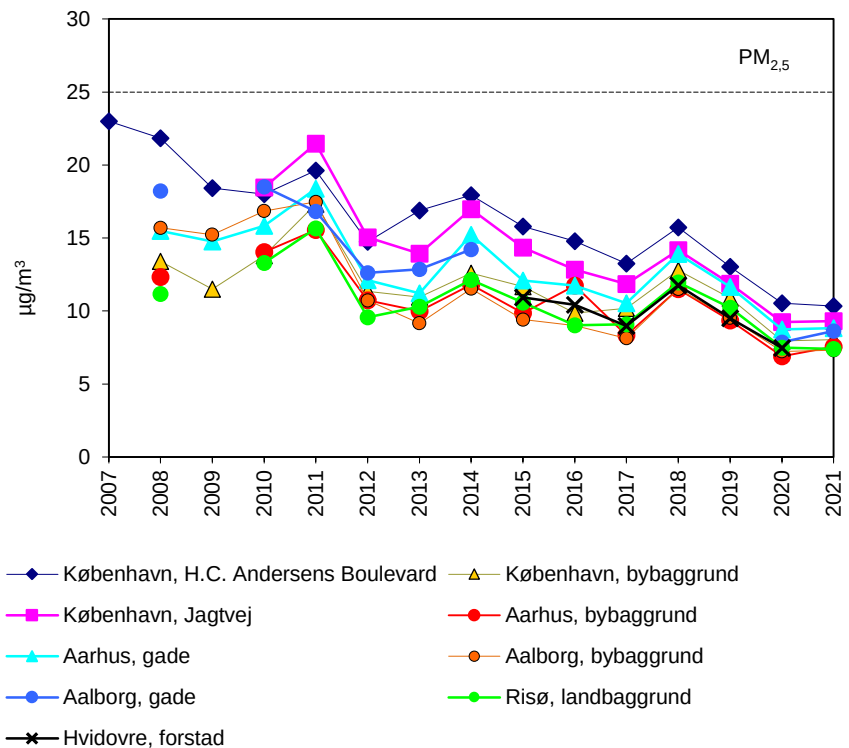
	$\text{PM}_{2,5}$ Årsmiddel	PM_{10} Årsmiddel	PM_{10} Antal dage med døgnmiddelværdi over 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Partikelantal	
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Antal dage	11 - 478/550 nm Antal/ cm^3	41 - 478/550 nm Antal/ cm^3
Grænseværdi	25	40	35		
<i>Gade</i>					
København, H.C. Andersens Boulevard	10	23	8	9200	2800
København, Jagtvej	9,3	17	1		
Odense, Grønløkkevej		16	3		
Aarhus, Banegaardsgade	8,8	16	0		
Aalborg, Vesterbro	8,6				
<i>Bybaggrund</i>					
København	8,0	13	0	3000	1600
Aarhus	7,6				
Aalborg	7,3				
<i>Forstad</i>					
Hvidovre*	8,5*			4000*	1800*
<i>Landbaggrund</i>					
Keldsnor		13	0		
Risø	7,4	12	1	2600	1400

* Datadækningen ved målestationen i Hvidovre er på 48% for $\text{PM}_{2,5}$ og på 46% for partikelantal. Den reducerede datadækning skyldes flytningen af målestationen.

Forholdet $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2,5}$ ligger på gadestationerne omkring 2, mens det på by- og landbaggrundstationerne, ligger på omkring 1,6. Dette hænger sammen med, at PM_{10} omfatter en større del af de luftbårne partikler end $\text{PM}_{2,5}$. Når man kigger på den samme partikelfraktion (respektiv $\text{PM}_{2,5}$ eller PM_{10}), så ses relativt lille forskel mellem niveauerne på de forskellige typer målestationer, og også indenfor de samme typer af målestationer (Tabel 7.2). Til eksempel er der i Københavnsområdet kun ca. 10% og 25% højere værdier for $\text{PM}_{2,5}$ i henholdsvis bybaggrunden og på gadestationerne end målt ved landbaggrundsmålestationen. Endvidere ligger $\text{PM}_{2,5}$ på de fire gademålestationer indenfor $\pm 9\%$ af middelværdien. Årsagen til dette er, at langt hovedparten af $\text{PM}_{2,5}$ og PM_{10} er fra luftbåren langtransport, og at der i forbindelse med langtransporten sker en udjævning af de geografiske forskelle.

7.3 Udviklingstendens

Målingerne af PM_{10} begyndte i 2001, mens målinger af $PM_{2,5}$ først blev påbegyndt i 2007/2008 i forbindelse med revision af EU's luftkvalitetsdirektiv (EU, 2008). Figur 7.3 viser udviklingstendensen for årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$ og PM_{10} . Der ses et ensartet forløb ved alle målestationerne. $PM_{2,5}$ er faldet med 40-55% og PM_{10} med 40-50% siden opstart af målingerne i henholdsvis 2007/2008 og 2001.

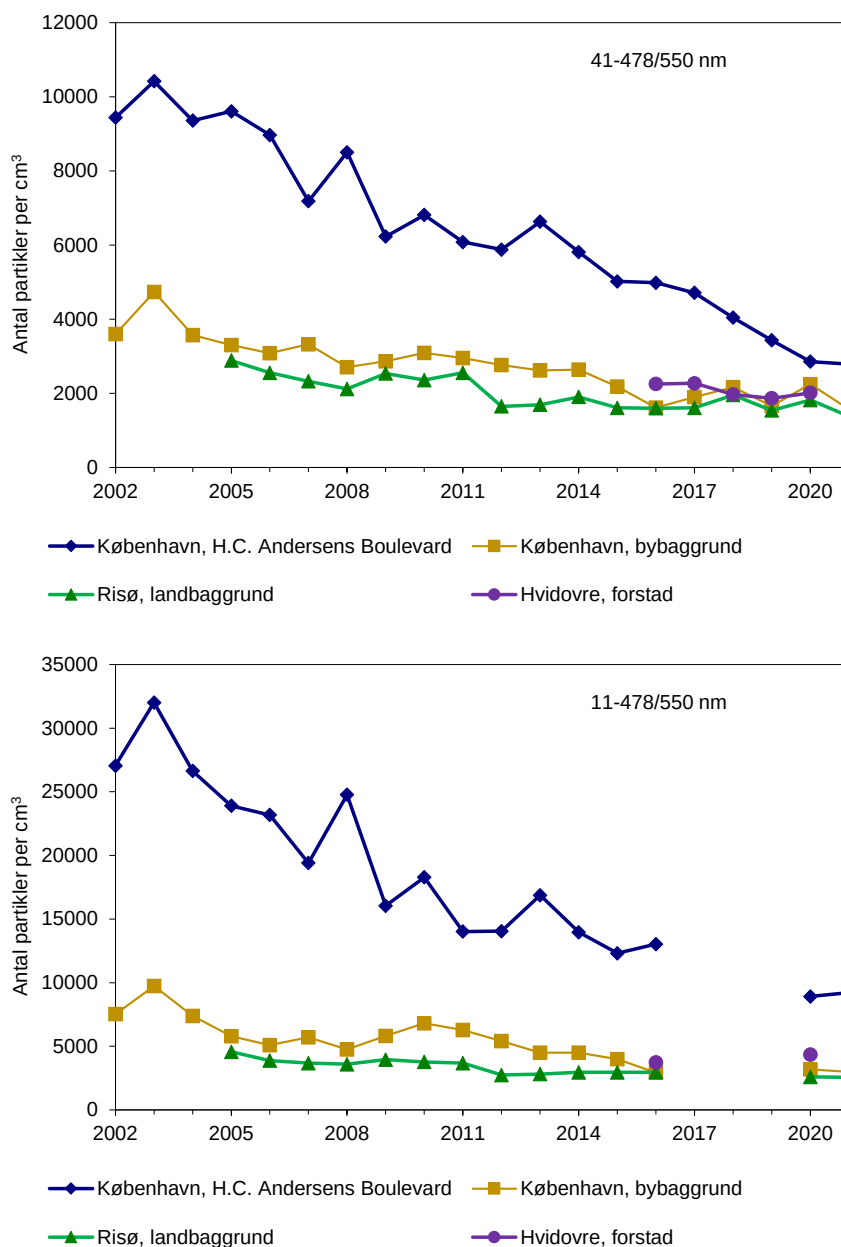


Figur 7.3. Udviklingstendens for årsmiddelværdi af PM_{2,5} (øverst) og PM₁₀ (nederst). De stiplede linjer angiver grænseværdierne for årsmiddelværdien af PM_{2,5} og PM₁₀ (EU, 2008). Fra og med 2012 er PM-værdierne vist ved ambient temperatur og tryk. Til og med 2011 er PM-værdierne vist ved standard betingelser. Ændringen er ca. 2-4% og er ubetydelig i den grafiske præsentation.

Figur 7.4 viser udviklingstendensen for partikelantallet for partikler med diameter på 41 - 478/550 nm (øverst) og udviklingstendensen for partikelantallet for partikler med diameter på 11 - 478/550 nm (nederst), hvor der mangler data for 2017 til 2019 grundet førnævnte problemer med målingerne af partikler med diameter under 41 nm.

Der ses i store træk et parallelt fald i partikelantallet for de to fraktioner. Siden 2002 er partikelantallet for begge fraktioner faldet med omkring 70% og 45% ved henholdsvis gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard og bybaggrundsmålestationen i København. Målinger i landbaggrund ved Risø er først begyndt i 2005, men siden da er partikelantallet faldet med omkring 40% for fraktionen fra 11 - 478/550 nm og omkring 50% for partikelfractionen fra 41 - 478/550 nm.

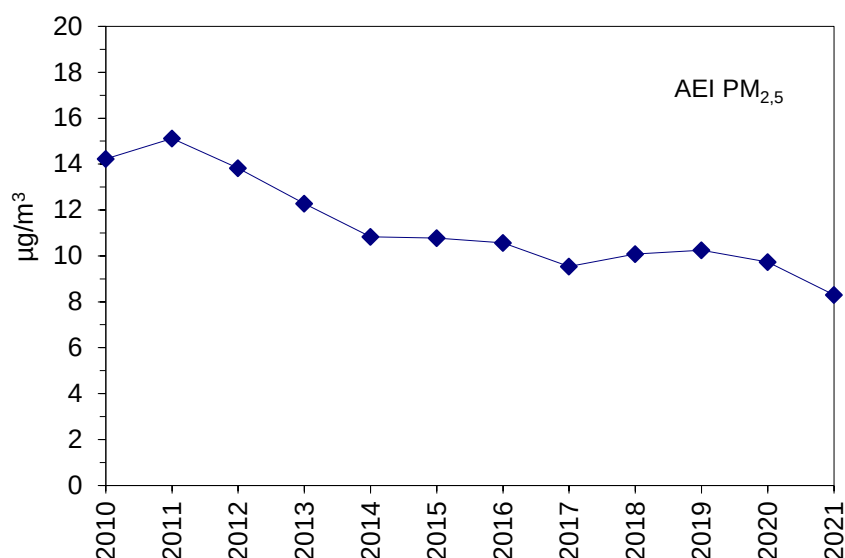
Tidsserien for målingerne i forstad (Hvidovre) er relativt kort (begyndt 2015), men siden opstart er partikelantallet faldet med omkring 10% for partikelfractionen fra 41 til 478/550 nm. Tidsserien er relativt kort og derfor er udviklingstendensen forbundet med stor usikkerhed. For 2021 er datadækningen for Hvidovre kun 46% på grund af flytning af målestationen, hvorfor der ikke er udregnet et fald i forhold til 2021 for Hvidovre.



Figur 7.4. Antallet af partikler med diameter mellem 41 nm og 478/550 nm (øverst) og antallet af partikler med diameter mellem 11 nm og 478/550 nm (nederst). Manglende data i perioden fra 2017-2019 skyldes instrumenttekniske problemer med at måle partikelantal i området 11-41 nm i disse år.

Det nationale reduktionsmål for $PM_{2.5}$ afhænger af AEI i 2010, som i Danmark lå på $14 \mu g/m^3$ (Figur 7.5). AEI for 2010 er beregnet på basis af årsgennemsnit for 2008-2010. I henhold til EU's luftkvalitetsdirektiv er det nationale reduktionsmål for Danmark en reduktion i AEI på 15%, som skulle være opnået i 2020 (EU, 2008). For 2020 (gennemsnit for 2018-2020) lå AEI på $10 \mu g/m^3$, hvilket ligger på niveau med de seneste par år. Siden 2010 er der i forhold til 2020 sket et fald i AEI på omkring 30% (Figur 7.5), og Danmark opfyldte dermed EU's nationale reduktionsmål. Faldet fra 2010 i forhold til 2021, ligger på omkring 40%.

EU's luftkvalitetsdirektiv indeholder også et krav om, at eksponeringskoncentrationen (AEI) ikke må overskride $20 \mu g/m^3$ fra 2015. Denne forpligtelse har været overholdt lige siden den trådte i kraft.

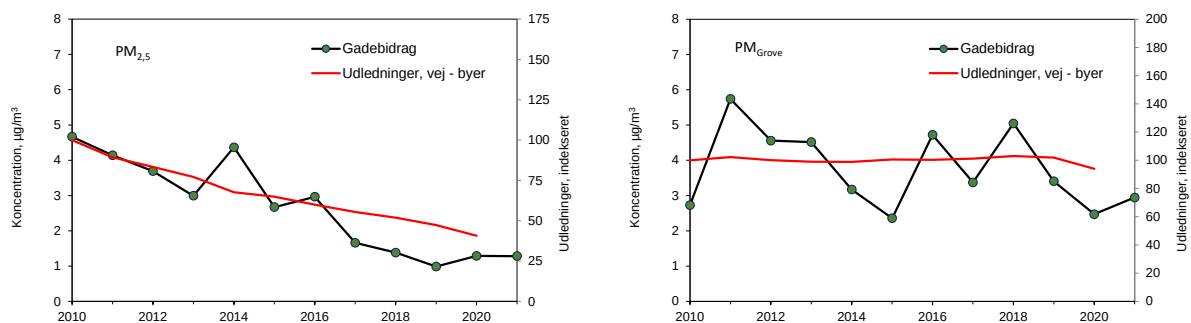


Figur.7.5. Udviklingstendens for Average Exposure Index (AEI) for Danmark siden 2010. AEI beregnes som middel af tre år, så indeks for 2010 er gennemsnit fra 2008-2010 og så fremdeles.

Det giver ikke mening at sammenligne udviklingen i målte luftkoncentrationer for partikelforurening med udviklingstendensen for de direkte udledte partikler, da de direkte udledte partikler kun udgør en lille andel af den samlede partikelforurening i luften. Langt hovedparten af gadebidraget til partikelforurening kommer imidlertid fra de direkte udledte partikler fra trafikken i gaden. Derfor giver det mening at sammenligne udviklingen for det observerede gadebidrag med udviklingen i de direkte udledte partikler fra vejtransport.

Figur 7.6 viser en sådan sammenligning mellem gadebidraget til fine og grove partikler beregnet for målestationen på Jagtvej. For de fine partikler ses et fald på omkring 80% i gadebidraget siden 2010. Udledningerne fra vejtransport, som består af fine partikler fra udstødning samt slid på bremses, dæk og vej, er i store træk faldet i samme takt som faldet i gadebidraget. Faldet i udledningerne skyldes alene fald i udledning af partikler fra udstødningen som følge af forbedringer af køretøjerne, hvor navnlig partikelfiltre spiller en stor rolle. Det er ligeledes faldet i de direkte udledninger af fine partikler, som er den væsentligste årsag til faldet i partikelantallet. Ved gademålestationen er det navnlig den øgede anvendelse af partikelfiltre, som giver anledning til reduktionerne.

For de grove partikler ses stor fluktuation mellem årene, hvilket formentligt skyldes de relativt store usikkerheder, der er forbundet med beregning af gadebidraget for de grove partikler (det beregnes ud fra resultaterne fra fire sæt målinger på to forskellige målestationer, hvilket samlet set giver en større usikkerhed). Den generelle tendens er, at niveauet har været konstant siden 2010. Dette er i overensstemmelse med forventningerne baseret på udviklingen i udledningerne af grove partikler fra vejtransport i byerne. De grove partikler fra vejtrafik kommer udelukkende fra slid på bremses, dæk og vej, og disse udledninger har været på konstant niveau siden 2010, mens der tidligere har været en stigning på omkring 30% fra 1990 til 2010 (Figur 7.6, Nielsen et al., 2022).



Figur 7.6. Udviklingen i gadebidraget til fine (PM_{2,5}) og grove partikler (PM_{Grove}) ved Jagtvej sammenholdt med den relative udvikling i udledningerne af henholdsvis fine og grove partikler fra vejtransport i byerne (Nielsen et al., 2022). Gadebidraget er beregnet som forskellen mellem målte luftkoncentrationer ved Jagtvej og i bybaggrund i København (H.C. Ørsted Institutet). Udledningerne er indekseret til 100 i 2010.

7.4 Modelberegninger

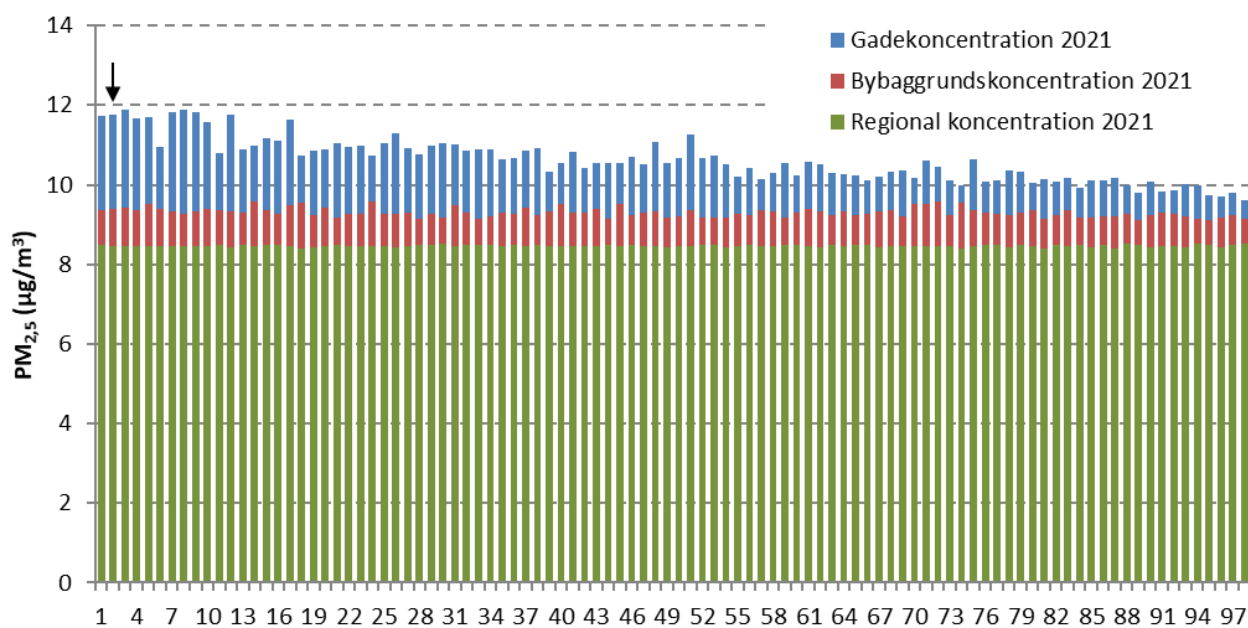
Modelberegninger af årsmiddelkoncentrationer af PM_{2,5} og PM₁₀ for udvalgte gader i København og Aalborg blev første gang rapporteret inden for Det Nationale Luftkvalitetsovervågningsprogram i 2017. De udvalgte gader repræsenterer trafikerede gader og er hovedsageligt lukkede gaderum. Koncentrationerne er forhøjede i denne type gader på grund af de høje emissioner og begrænsede spredningsforhold. 98 gader er inkluderet for København og 26 for Aalborg. ÅDT (årsdøgntrafik, dvs. gennemsnitlig døgntrafik over et år) er mellem 5.000 og 80.000 køretøjer om dagen i København og mellem 1.900 og 36.400 køretøjer om dagen i Aalborg.

Der er foretaget modelberegninger af årsmiddelkoncentrationen af PM_{2,5} og PM₁₀ med henblik på at sammenligne med grænseværdier. Grænseværdien for luftkvaliteten som årsmiddel er henholdsvis 25 og 40 µg/m³ for PM_{2,5} og PM₁₀ (EU, 2008). Endvidere sammenlignes med WHO's retningslinjer for luftkvalitet, som er hhv. 5 og 15 µg/m³ for PM_{2,5} og PM₁₀ (WHO, 2021a).

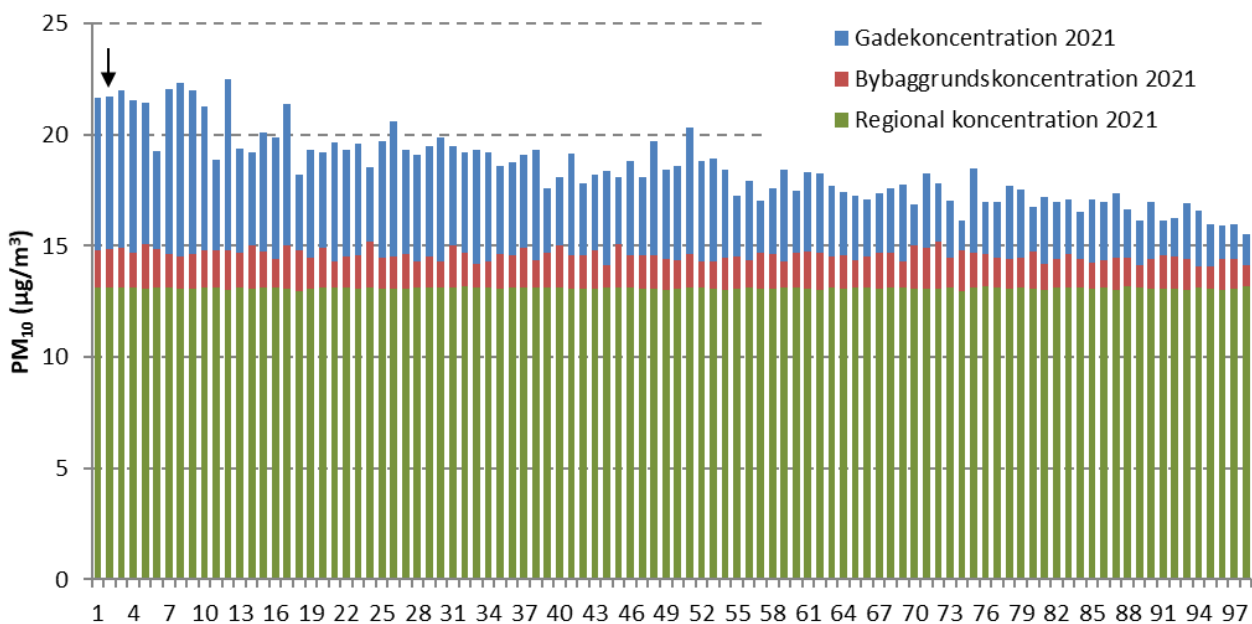
København

Figur 7.7 og 7.8 viser de modellerede årsmiddelkoncentrationer for PM_{2,5} og PM₁₀ for de udvalgte gadestrækninger i København. Rangordenen fra kvælstofdiioxid er bevaret, og gadenumrene vises i Tabel 7.6.

Årsmiddelkoncentrationerne ligger på 10-12 µg/m³ i 2021 (ligeledes 10-12 µg/m³ i 2020) og 16-23 µg/m³ i 2021 (ligeledes 16-23 µg/m³ i 2020) for henholdsvis PM_{2,5} og PM₁₀. I gennemsnit er årsmiddelkoncentrationer for PM_{2,5} uændrede, mens der er et lille fald for PM₁₀ på 0,5 µg/m³ fra 2020 til 2021. Der ses således meget små ændringer i partikelkoncentrationerne fra 2020 til 2021, hvilket også er i overensstemmelse med målingerne. De modellerede årsmiddelkoncentrationer ligger et godt stykke under grænseværdien for PM_{2,5} på 25 µg/m³ og grænseværdien for PM₁₀ på 40 µg/m³, så i lighed med målingerne ses ingen overskridelse af grænseværdierne for årsmiddelkoncentrationerne i København. Derimod er WHO's nye retningslinjer for luftkvalitet på 5 µg/m³ for PM_{2,5} og 15 µg/m³ for PM₁₀ overskredet på samtlige gadestrækninger i København.



Figur 7.7. Modellerede årsmiddelkoncentrationer for $PM_{2.5}$ for de 98 udvalgte gadestrækninger i København i 2021. Gaderne er rangordnet efter koncentrationerne af kvælstofdioxid (Kapitel 2.4). Pilen angiver gadestrækning (HCAB) med en målestation.



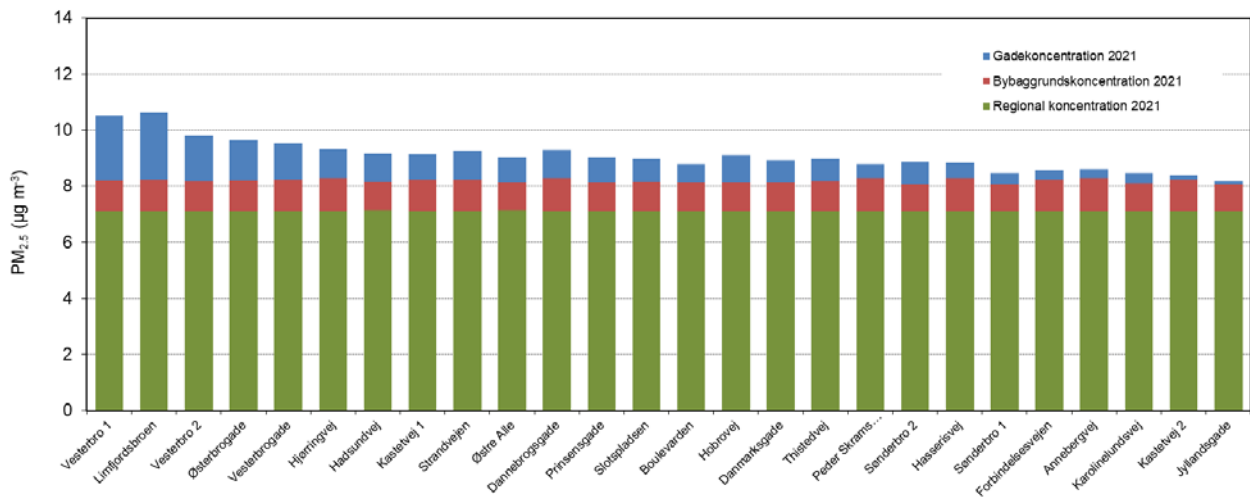
Figur 7.8. Modellerede årsmiddelkoncentrationer for PM_{10} for de 98 udvalgte gadestrækninger i København i 2021. Gaderne er rangordnet efter koncentrationerne af kvælstofdioxid (Kapitel 2.4). Pilen angiver gadestrækning (HCAB) med en målestation.

Tabel 7.6. Rangnummer og navne for gadestrækninger, der er vist i Figur 7.7 og 7.8. Gaderne er nummererede (1-98) i forhold til kvælstofdioxidniveauer i 2021 (1 = højeste, 98 = laveste). Tallene i parentes refererer til forskellige delstrækninger af den samme gade, der har mere end én modelberegning. En stjerne (*) angiver en gadestrækningen med en målestation.

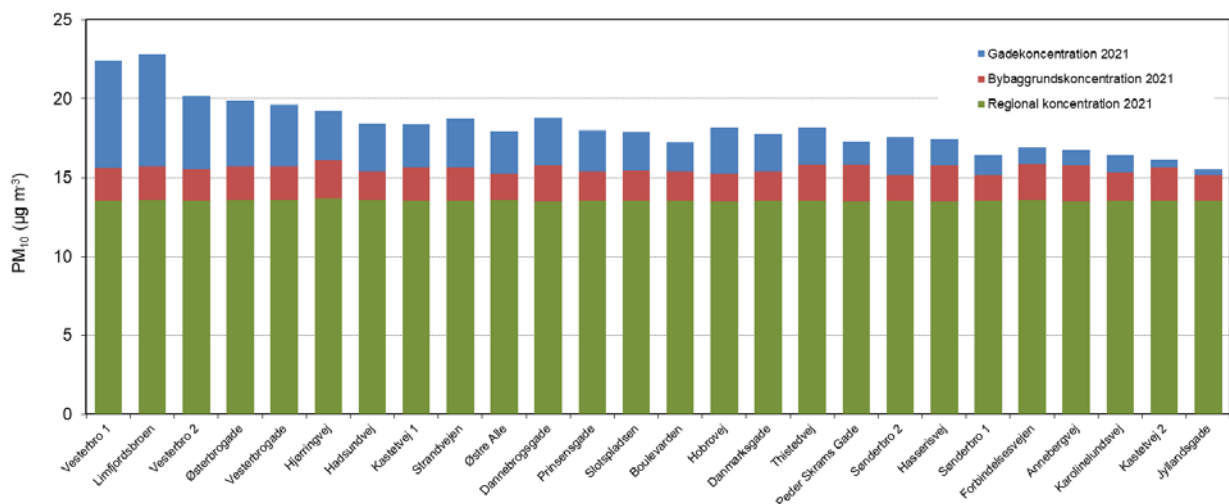
Nr.	Gadenavn	Nr.	Gadenavn	Nr.	Gadenavn
1	H C Andersens Boulevard(2)	34	Vesterbrogade(3)	67	Jagtvej(2)
2*	H C Andersens Boulevard(1)	35	Tagensvej(3)	68	Godthåbsvej(2)
3	H C Andersens Boulevard(3)	36	Amagerfælledvej	69	Grøndals Parkvej
4	Gyldenløvesgade	37	Toldbodgade	70	Dag Hammarskjølds Allé
5	Øster Søgade	38	Gammel Kongevej(1)	71	Folke Bernadottes Allé
6	Hammerichsgade	39	Vester Farimagsgade	72	Øster Voldgade(2)
7	Åboulevard(1)	40	Nørre Voldgade(2)	73	Bülowsvej(2)
8	Ågade	41	Nordre Fasanvej(3)	74	Strandvejen(2)
9	Åboulevard(3)	42	Jagtvej(3)	75	Rebildvej
10	Nørre Søgade	43	Østerbrogade(4)	76	Englandsvej(1)
11	Bernstorffsgade(1)	44	Søndre Fasanvej(2)	77	Istedgade
12	Lyngbyvej(2)	45	Nørre Farimagsgade	78	Frederikssundsvej(5)
13	Amagerbrogade(2)	46	Torvegade	79	Ålholmvej(2)
14	Øster Voldgade(1)	47	Hillerødgade(1)	80	Blegdamsvej
15	Bernstorffsgade(2)	48	Frederikssundsvej(8)	81	Frederiksborgvej(1)
16	Enghavevej	49	Tagensvej(1)	82	Vesterfælledvej
17	Fredensgade	50	Godthåbsvej(3)	83	Slotsherrensvej(2)
18	Strandvejen(1)	51	Jyllingevej(1)	84	Artillerivej
19	Tagensvej(2)	52	Gammel Køge Landevej(1)	85	Frederikssundsvej(2)
20	Stormgade	53	Folehaven(1)	86	Peter Bangs Vej(1)
21	Toftegårds Allé(1)	54	Tuborgvej(2)	87	Tuborgvej(1)
22	H.C. Ørsteds Vej(2)	55	Frederikssundsvej(1)	88	Amagerbrogade(3)
23	Frederikssundsvej(3)	56	Roskildevej(1)	89	Peter Bangs Vej(2)
24	Gothersgade(1)	57	Nørrebrogade	90	Slotsherrensvej(1)
25	Falkoner Alle(2)	58	Tagensvej(4)	91	Bellahøjvej
26	Tomsgårdsvej(2)	59	Kalvebod Brygge	92	Halmetgade
27*	Jagtvej(1)	60	Amager Boulevard	93	Strandvænget(2)
28	Scandiagade	61	Hulgårdsvej(2)	94	Røde Mellemvej(2)
29	Vesterbrogade(1)	62	Østerbrogade(1)	95	Gammel Køge Landevej(2)
30	P Knudsens Gade(2)	63	Røde Mellemvej(1)	96	Frederiksborgvej(2)
31	Bredgade	64	Hillerødgade(3)	97	Vigerslevvej(2)
32	Amagerbrogade(1)	65	Ålholmvej(1)	98	Englandsvej(2)
33	Nordre Fasanvej(1)	66	Ingerslevsgade		

Aalborg

De modellerede årsmiddelkoncentrationer ligger på 8-11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2021 (ligeledes 8-11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2020) og 16-23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2021 (17-25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2020) for henholdsvis $\text{PM}_{2.5}$ og PM_{10} . I gennemsnit er årsmiddelkoncentrationer af $\text{PM}_{2.5}$ konstante og PM_{10} faldet lidt med 1,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ fra 2020 til 2021. Der ses også meget små ændringer i partikelkoncentrationerne fra 2020 til 2021. Årsmiddelkoncentrationerne ligger dermed et godt stykke under grænseværdien for $\text{PM}_{2.5}$ på 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ og under grænseværdien for PM_{10} på 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Derimod er WHO's nye retningslinjer for luftkvalitet på 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for $\text{PM}_{2.5}$ og 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM_{10} overskredet på samtlige gadestrækninger i Aalborg.



Figur 7.9. Modelberegnete årsmiddelkoncentrationer for $\text{PM}_{2.5}$ for 26 udvalgte gadestrækninger i Aalborg i 2021. Gaderne er rangordnet efter koncentrationerne af kvælstofdioxid (Kapitel 2.4).



Figur 7.10. Modelberegnete årsmiddelkoncentrationer for PM_{10} for 26 udvalgte gadestrækninger i Aalborg i 2021. Gaderne er rangordnet efter koncentrationerne af kvælstofdioxid (Kapitel 2.4).

8. Elementært – og organisk kulstof

Elementært kulstof (EC) er den del af den luftbårne partikelforurening, som udgøres af kulstof alene. I daglig tale omtales det ofte som sod, da en stor del af elementært kulstof kommer fra en ufuldstændig forbrænding (for eksempel i udstødning fra køretøjer). Elementært kulstof omtales også som black carbon (BC), fordi elementært carbon er sort. Kemisk set er der stor forskel på de to parametre. Elementært kulstof er et mål for mængden af kulstofatomer i en given prøve (μg elementært kulstof per m^3), hvilket måles med en kemisk analyse af prøven. Black carbon er et mål for, hvor "sort" prøven er, hvilket måles med en absorptionsmåling (kan omregnes til enheden $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Der er en tæt korrelation mellem elementært kulstof og black carbon, som er tæt på at være lineær, men forholdet mellem elementært kulstof og black carbon varierer fra lokalitet til lokalitet grundet lokal variation i den kemiske sammensætning af partikelforureningen (WHO, 2021a).

Organisk kulstof (OC) er den del af den luftbårne partikelforurening, som udgøres af kulstof, der er bundet i organiske kemiske forbindelser. Organisk kulstof er kun den masse, som svarer til kulstofatomerne i de organiske kemiske forbindelser. De organiske kemiske forbindelser indeholder også brint og en række andre atomer, hvoraf ilt, kvælstof, svovl og fosfor er nogle af de hyppigste. For at bestemme den samlede masse af den luftbårne organiske partikelforurening (OM) korrigeres organisk kulstof med en faktor mellem 1,5 og 2,1 afhængigt af lokaliteten (Turpin et al., 2010).

Organisk kulstof udledes direkte i forbindelse med afbrænding af en lang række brændstoffer. Organisk kulstof kan imidlertid også komme fra naturlige kilder, og det kan dannes i forbindelse med den kemiske omdannelse af flygtige organiske forbindelser i luften.

Danmark og de øvrige europæiske lande udarbejder nationale opgørelser over udledningerne af black carbon, mens der ikke laves opgørelser for elementært kulstof. Datagrundlaget for opgørelse af udledningerne af black carbon er begrænset, så derfor er der i den fælleseuropæiske guidebog (EEA, 2019) ofte tale om estimering af udledningerne af black carbon på baggrund af udledningsfaktorer for elementært kulstof. Derfor er der stor usikkerhed på opgørelser over udledningerne. Da der er omtrent lineær sammenhæng mellem elementært kulstof og black carbon, så giver det fagligt set god sammenhæng at lave sammenligning mellem udviklingstendens for elementært kulstof og udledningerne af black carbon.

Der laves endnu ingen nationale opgørelser over udledningerne af organisk kulstof. EU's luftkvalitetsdirektiv indeholder krav om overvågning af luftbåren elementært - og organisk kulstof i den fine partikelfraktion ($\text{PM}_{2.5}$) på en enkelt målestation i hvert medlemsland. Da disse komponenter udgør en vigtig del af den helbredsskadelige partikelforurening, så bliver der på basis af EU-kravet og det nationale vidensbehov samlet set udført målinger ved fire målestationer i Københavnsområdet (gademålestation H.C. Andersens Boulevard, bybaggrund H. C. Ørsted Instituttet, forstad Hvidovre, landbaggrund Risø).

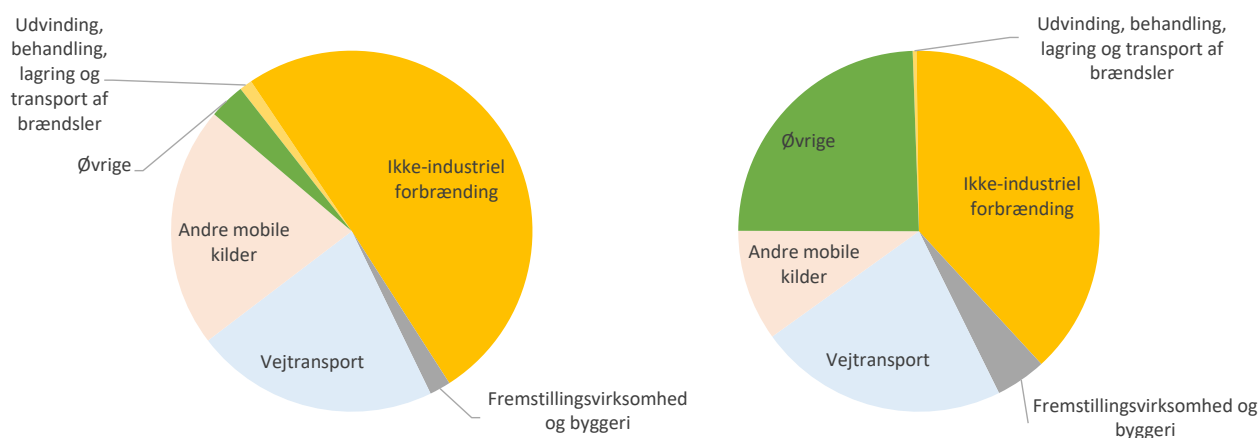
8.1 Udledninger

Den vigtigste kilde til udledningerne af black carbon i 2020 er helt klart ikke-industriel forbrænding, som står for omkring halvdelen af udledningerne (Figur 8.1 og Tabel 8.1), hvoraf hovedparten er fra boligopvarmning med træfyring. Vejtransport og andre mobile kilder bidrager ligeligt med hver 22% af udledningerne og er de næststørste kilder til black carbon.

Tidligere var det mobile kilder, som var den vigtigste kilde til black carbon, men en række forbedringer på køretøjer og ikke-vejgående maskiner har ført til betydelige fald (omkring 80%) i udledningerne siden 1990 (Figur 8.2). Det er især anvendelsen af partikelfiltre, som har haft stor betydning. Til sammenligning er udledningerne fra ikke-industriel forbrænding i dag på stort set samme niveau som i 1990, hvilket er forklaringen på, at ikke-industriel forbrænding har overhalet udledningerne fra mobile kilder (Figur 8.2).

Udover faldet inden for mobile kilder er der også sket et betydeligt fald i udledningerne fra udvinding, behandling, lagring og transport af olie og gas (fald på 89%), hvilket hænger sammen med et lavere forbrug af kul. Samlet set er der sket et fald i udledningerne af black carbon på omkring 66% siden 1990 (Figur 8.2).

For EU-27 ses et nogenlunde tilsvarende mønster som i Danmark (Figur 8.1 og 8.2), hvor ikke-industriel forbrænding dog udgør næsten halvdelen af udledningerne i Danmark, mens de kun udgør omkring 40% på EU-niveau. Faldet i udledningerne er noget større i Danmark end for EU-27 (Figur 8.2).

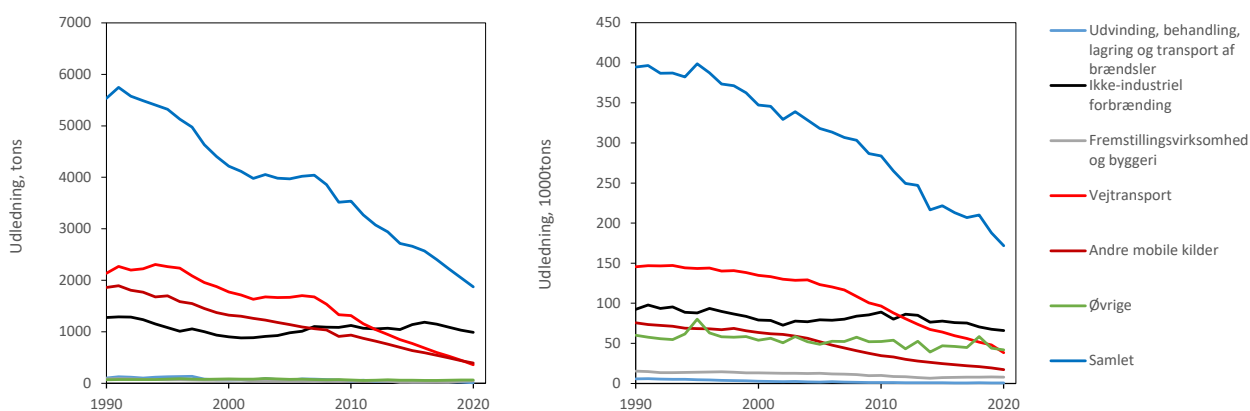


Figur 8.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af black carbon i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2020. Figurene viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2022, CEIP, 2023).

Tabel 8.1. Kilderne til menneskabte udledninger af black carbon i Danmark i 2020 (Nielsen et al., 2022). Kilderne er opgjort i 10 hovedkategorier med en yderligere underopdeling for "Ikke-industriel forbrænding" og "Vejtransport". Opdelingen er baseret på SNAP-koder (Selected Nomenclature for Air Pollution).

Kategori	SNAP-kode	Udledninger 2020	
		Tons	%
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	29	1
Ikke-industriel forbrænding	2	1031	50
<i>Handel og service</i>	201	19	1
<i>Husholdninger</i>	202	767	37
<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	203	246	12
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	39	2
Industrielle processer	4	3	0
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	5	24	1
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	6	0
Vejtransport	7	447	22
<i>Udstødning</i>	701-706	280	14
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	168	8
Andre mobile kilder*	8	442	22
Affald	9	0	0
Landbrug	3b,d,f-i	28	1
Samlet		2050	100

* Data inkluderer national søfart, al flyvning under 3000 fod, togtrafik, militær, fritidsfartøjer, fiskeri, og arbejdsredskaber inden for landbrug, skovbrug, industri, handel/service og husholdninger.



Figur 8.2. Udviklingen i udledningerne af black carbon i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) siden 1990 (Nielsen et al., 2022; CEIP, 2023). Da der er fejl i de indrapporterede data for en af underkategorierne fra Bulgarien i perioden fra 2000 til 2006 er disse data erstattet ved interpolation.

8.2 Status for luftkvalitet

Tabel 8.2 viser årsmiddelkoncentrationerne af elementært kulstof målt ved de fire målestationer i Københavnsområdet, hvor elementært kulstof måles kontinuerligt året rundt. De største koncentrationer ses ved gademålestationen, hvilket hænger sammen med, at trafik er en af de største kilder til elementært kulstof. Næsthøjeste koncentrationer ses i Hvidovre, hvor brændefyring fra nærområderne i højere grad bidrager til koncentrationerne end det er tilfældet ved land- og bybaggrundsstationerne. Bemærk dog at der for 2021 mangler data for det meste af sommerhalvåret grundet flytning af målestationen. De angivne værdier for Hvidovre er derfor højere end årsmiddelværdien, da

udledningerne af elementært kulstof er højest om vinteren grundet blandt andet brændefyring.

De mindste koncentrationer ses ved landbaggrundsmålestationen ved Risø. Der er relativt stor forskel mellem niveauerne, hvor koncentrationen på gademålestationen ligger omkring en faktor tre højere end på landbaggrund. Til sammenligning er der kun omkring 20-30% større niveauer af PM_{2,5} ved gademålestationen sammenlignet med landbaggrund (Afsnit 7.2). De lokale kilder har derfor større betydning for elementært kulstof end for de fine partikler.

Årsmiddeldkoncentrationerne af organisk kulstof ligger generelt højere end for elementært kulstof. Der er mindre forskel mellem målestationerne, og der er væsentligt højere baggrundskoncentrationer (Tabel 8.2). Den langtransporterede luftforurening har derfor større betydning for organisk kulstof end for elementært kulstof.

Tabel 8.2. Årsmiddelværdier for elementært- og organisk kulstof i 2021. Grundet flytning af målestationen i Hvidovre mangler data for juni til og med oktober. De angivne værdier er noget højere end årsmiddelværdien for målestationen i Hvidovre.

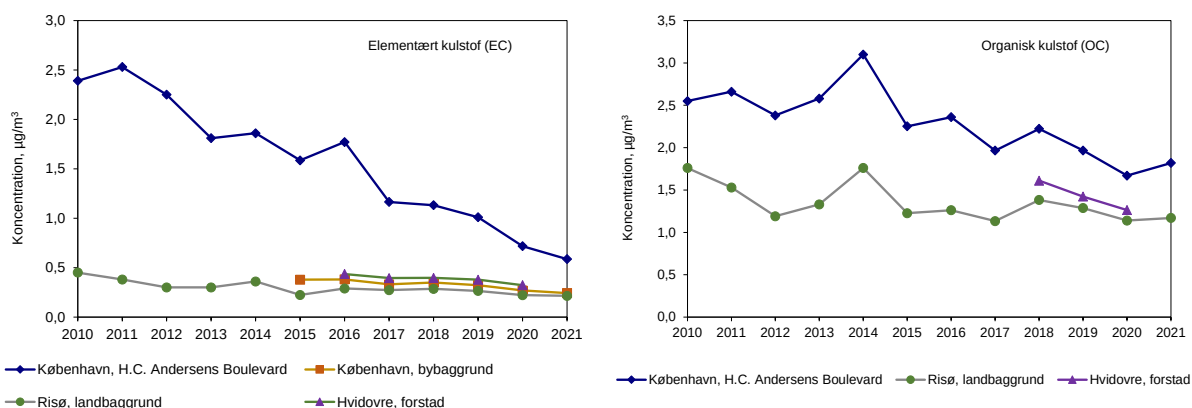
	Elementært kulstof µg/m ³	Organisk kulstof µg/m ³
<i>Gade</i>		
København, H.C. Andersens Boulevard	0,59	1,82
<i>Bybaggrund</i>		
København	0,24	
<i>Forstad</i>		
Hvidovre	0,36*	1,40*
<i>Landbaggrund</i>		
Risø	0,22	1,17

* Datadækningen ved målestationen i Hvidovre er reduceret grundet flytning af målestationen.

8.3 Udviklingstendens

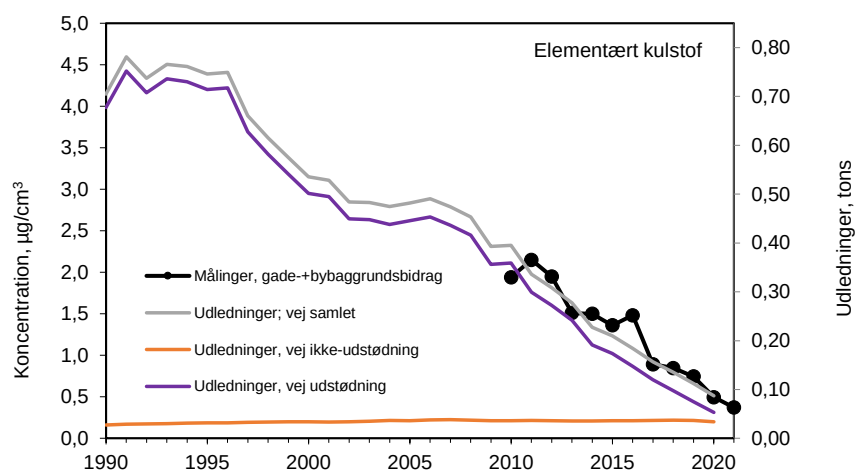
Figur 8.3 viser udviklingstendensen for EC siden begyndelsen af målingerne i 2010. Der ses et fald på omkring 75% siden 2010 ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard. Tilsvarende ses et fald på landbaggrundsmålestationen ved Risø, selv om dette fald er mindre markant (omkring 45%). Ved bybaggrundsmålestationen og målestationen i forstad ses også tendens til fald, men tidsserierne er korte, så denne tendens er usikker, og der er behov for målinger gennem længere tid for at kunne opnå en sikker vurdering af udviklingstendensen.

Der ses også fald i årsmiddeldkoncentrationerne af organisk kulstof, men det er et noget mindre fald (25-35% siden 2010) end for elementært kulstof. De relativt høje værdier ved begge målestationer i 2014 skyldes formentlig år til år variationer i de meteorologiske forhold.



Figur 8.3. Udviklingstendens for årsmiddelkoncentrationerne af elementært kulstof (venstre) og organisk kulstof (højre). Målingerne blev påbegyndt i 2010 ved gademålestationen (H. C. Andersens Boulevard) og landbaggrund (Risø), mens målingerne i bybaggrund (H.C. Ørsted Institutet) og forstad (Hvidovre) først blev begyndt i 2015. Målingerne af elementært kulstof ved bybaggrundsmålestationen i København ligger uden for Delprogram for luft under NOVANA og finansieres særskilt af Miljøstyrelsen. Der måles ikke organisk kulstof ved bybaggrundsmålestationen. Figurene viser ikke data fra Hvidovre for 2021 grundet flytningen af målestationen i 2021.

Årsagen til det store fald i elementært kulstof skyldes primært reduktionen i udledninger fra transportsektoren. Figur 8.4 viser en sammenligning mellem udviklingstendensen for gade- og bybaggrundsbidraget målt ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard og udviklingstendensen i udledningerne fra vejtrafik. Der ses god overensstemmelse mellem faldet i koncentrationerne og udledningerne, hvilket viser den store betydning, som indførelse af miljøforbedringer på køretøjerne (navnlig partikelfiltre på dieselskøretøjer) har haft på partikelforureningen. Da der ikke er udarbejdet nationale opgørelser over udledningerne af organisk kulstof, er det sværere at vurdere årsagerne til de observerede fald. Det generelle fald i udledningerne af fine partikler og flygtige organiske forbindelser vurderes dog at være nogle af de vigtigste faktorer.



Figur 8.4. Udviklingen i luftkoncentrationer af partikulært bundet elementært kulstof på gademålestation på H.C. Andersens Boulevard i København (venstre akse) sammenholdt med udviklingen i udledningerne af black carbon fra vejtrafik (højre akse) (Nielsen et al., 2022). De viste luftkoncentrationer er bidraget fra gade og bybaggrund, som er beregnet ud fra forskellen mellem koncentrationerne ved gademålestationen og landbaggrund. Udledningerne af black carbon kommer dels fra udstødning og dels fra ikke-udstødning (slid på bremses, dæk og vej).

9. Tungmetaller

Den luftbårne partikelforurening indeholder en lang række grundstoffer, hvoraf en del er tungmetaller, som er stærkt helbredsskadelige. Forurening med tungmetaller er derfor et vigtigt aspekt af den luftbårne partikelforurening selv om koncentrationerne for de fleste metaller og tungmetaller ligger 1000 gange lavere (ng/m^3) end for eksempel elementært kulstof ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Overvågningen af de luftbårne tungmetaller har primært fokus på de fire grundstoffer, som er omfattet af EU's fjerde datterdirektiv (EU, 2004) og luftkvalitetsdirektivet (EU, 2008). Det drejer sig om arsen, bly, cadmium og nikkel (arsen er egentligt ikke et tungmetal, men for overskuelighedens skyld medtages det under tungmetallerne i denne rapportering). Luftkvalitetsdirektivet (EU, 2008) angiver en grænseværdi for bly, og det fjerde datterdirektiv (EU, 2004) angiver målværdier (en slags grænseværdi) for arsen, cadmium og nikkel af hensyn til de langsigtede helbredseffekter af disse stoffer. Årsmiddelværdierne for arsen, bly, cadmium og nikkel må således ikke overstige følgende i et kalenderår:

Arsen	6 ng/m^3
Bly	500 ng/m^3
Cadmium	5 ng/m^3
Nikkel	20 ng/m^3

Kviksølv indgår ligeledes i det fjerde datterdirektiv, men da luftkoncentrationerne af kviksølv kun varierer meget lidt på europæiske skala, er kravene til overvågningen lempet i forhold til de øvrige stoffer. Overvågningen af kviksølv i Danmark varetages derfor via en samarbejdsaftale mellem Sverige og Danmark, således at den danske luftovervågning kan baseres på de svenske målinger på Råö tæt ved Göteborg. Derfor omtales kviksølv kun kortfattet i kapitlet.

Som supplement til de direktivbundne stoffer overvåges også seks andre tungmetaller (krom, jern, kobber, mangan, vanadium og zink), da disse også er vigtige i relation til de helbredsskadelige effekter af partikelforurening. Da der kun udarbejdes nationale opgørelser for udledninger af krom, kobber og zink, omtales jern, mangan og vanadium kun i forbindelse med selve målingerne af luftkvaliteten.

Overvågningen af de luftbårne tungmetaller blev etableret allerede i begyndelsen af 1980'erne og omfattede et stort antal målestationer. I dag omfatter overvågningen af tungmetaller målinger på to gademålestationer (København og Aarhus), en bybaggrundsmålestation (København) og to landbaggrundsmålestationer (Risø og Anholt). Årsagen til denne reduktion i måleprogrammet er primært, at der er sket et betydeligt fald i luftkoncentrationerne, hvilket har reduceret overvågningsbehovet. Det spiller dog ind, at det har været nødvendigt at udskifte analysemetoden til en mere arbejdskrævende metode. Det er derfor heller ikke muligt at opretholde det samme omfattende måleprogram uden væsentligt højere ressourceforbrug.

9.1 Udledninger

De årlige udledninger til luften af de udvalgte tungmetaller ligger på et langt lavere niveau end for de øvrige udledninger omtalt i de øvrige kapitler. For eksempel er de årlige udledninger af elementært kulstof omkring 40 gange større end udledningerne af zink og mere end 10.000 gange højere end for arsen (Tabel 9.1 og 8.1).

I 2020 ligger udledningerne for zink og kobber højest og dernæst kommer bly, mens de mere helbredsskadelige grundstoffer som arsen, cadmium, nikkel og krom ligger betydeligt lavere (Tabel 9.1). For arsen, cadmium og krom er det de stationære forbrændingskilder, som er ansvarlige for de højeste udledninger, mens vejtransport og anvendelse af opløsningsmidler og produkter er de næst vigtigste kilder (Figur 9.1). For de øvrige stoffer er det vejtransport, som er den væsentligste kilde efterfulgt af stationær forbrænding. Dette gælder navnlig for bly og kobber. For kobber er over 90% af udledningerne fra slid på bremses i forbindelse med vejtrafik. For nikkel og zink er udledningerne fra vejtransport og stationær forbrænding omtrent lige store.

Tabel 9.1. Årlige udledninger af tungmetaller i Danmark i 2020 fordelt på hovedkategorier (Nielsen et al., 2022). Bemærk at opdelingen er foretaget lidt anderledes og at ikke-industriell forbrænding er placeret under stationær forbrænding.

	Arsen	Bly	Cadmium	Nikkel	Krom	Kobber	Zink
	Tons	Tons	Tons	Tons	Tons	Tons	Tons
Stationær forbrænding	0,13	1,7	0,54	1,1	1,1	0,51	19
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	0,05	1,8	0,02	0,16	0,16	2,0	2,0
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	0,00	0	0	0	0	0	0
Vejtransport	0,03	5,8	0,05	1,4	0,2	38	27
Andre mobile kilder*	0,00	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02	0,94
Affald	0,00	2,2	0,01	0,01	0,01	0,08	8,5
Landbrug	0,00	0,01	0,05	0	0	0	0,03
Samlet	0,22	11	0,67	2,7	1,5	40	57

* Data inkluderer national søfart, al flyvning under 3000 fod, togtrafik, militær, fritidsfartøjer, fiskeri, og arbejdsredskaber inden for landbrug, skovbrug, industri, handel/service og husholdninger.

En lang række miljøtiltag har givet anledning til store reduktioner i danske udledninger, og har ligeledes ændret den relative betydning af de forskellige kilder til udledningerne (Figur 9.1 og 9.2). Udledningerne af bly er blevet reduceret med omkring 91% siden 1990, hovedsageligt som følge af udfasningen af anvendelsen af bly i benzin. Mindre brug af kul og forskellige rensningstiltag på forbrændingsanlæg har også bidraget til reduktionerne.

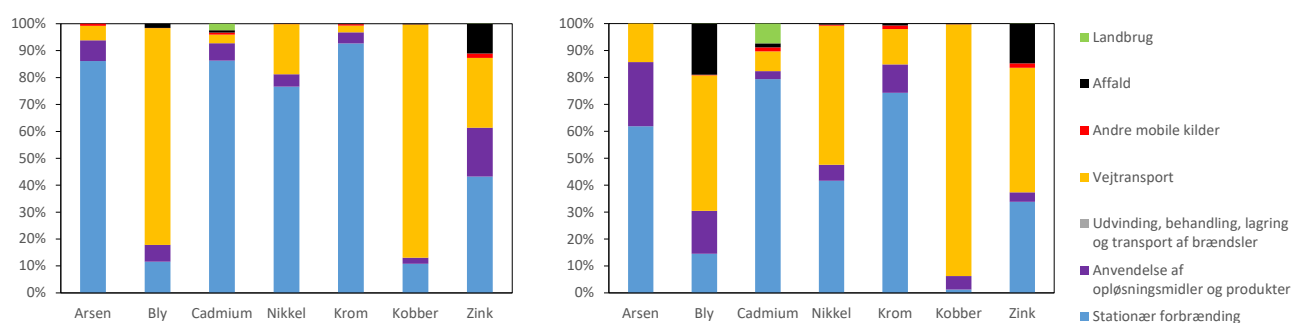
For arsen, nikkel og krom er der sket reduktioner på mellem 75 og 86%, hvilket navnlig skyldes forbedringerne i relation til forbrændingsanlæg. For cadmium er der sket en lidt mindre reduktion på omkring 46%. Faldet skyldes for en stor del fald i udledninger fra stationær forbrænding, men for cadmium er en meget stor andel af udledningerne fra brændefyring og affaldsforbrænding. Disse udledninger er på nogenlunde uændret niveau, så derfor slår faldet i udledningerne fra de større forbrændingsanlæg ikke helt så meget igennem som for arsen, nikkel og krom.

For zink er der kun sket et relativt beskedent fald på omkring 20%. Der har været et relativt stort fald i forbindelse med stationær forbrænding, men dette

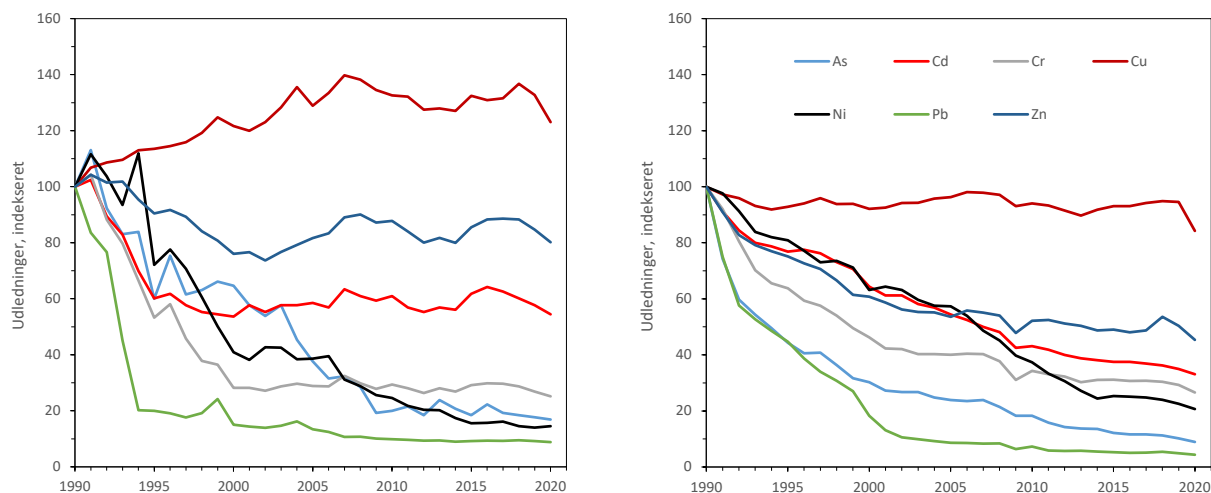
fald er stort set modsvaret af en øgning af udledningerne fra vejtransport, hvor zink kommer fra slid af bremses og dæk.

Kobber er i modsætning til de øvrige stoffer steget med omkring 33% i perioden fra 1990 til 2019 efterfulgt af et relativt markant fald på omkring 10% fra 2019 til 2020. Denne generelle stigning skyldes øgning af udledningerne fra vejtransport, hvor der har været en stor stigning i udledningen fra slid på bremseserne, som følge af en øget vejtrafik. Faldet fra 2019 til 2020 skyldes hovedsageligt fald i udledningerne fra vejtrafik og dermed kan ændringen fra 2019 til 2020 for en stor del skyldes covid-19-restriktionerne.

På EU-niveau er der sket en udvikling, som i store træk svarer til det, der er set for Danmark. Dog er der for EU set et lille fald i udledningerne af kobber, og der er mere markante fald i udledningerne af zink og cadmium (Figur 9.2).



Figur 9.1. Den relative fordeling af kilderne til udledning af arsen, bly, cadmium, nikkel, krom, kobber og zink i 1990 (venstre) og 2020 (højre), (Nielsen et al., 2022).



Figur 9.2. Relativ udviklingstendens for udledningerne af arsen (As), cadmium (Cd), krom (Cr), kobber (Cu), nikkel (Ni), bly (Pb) og Zink (Zn) i Danmark (venstre) og EU (højre), (Nielsen et al., 2022; CEIP, 2023). Udledningerne er indekseret til 100 i 1990.

9.2 Luftkvalitet

Tabel 9.2 viser årsmiddelkoncentrationerne for de fire direktivbundne tungmetaller samt seks yderligere tungmetaller. Ved gade- og bybaggrundsmålestationerne er det målinger af indholdet i PM_{10} , mens det ved landbaggrundsmålestationerne er målinger af indholdet i TSP (Total Suspended Particulate).

TSP omfatter partikler, som har diameter op til 15-20 µm, mens PM₁₀ kun omfatter partikler med diameter op til 10 µm. Der er dermed noget forskel mellem de to partikelfraktioner, som bliver opsamlet ved de forskellige målestationer. Dette har dog mindre betydning i forbindelse med en vurdering af forskellen mellem niveauerne ved de forskellige typer af målestationer.

Årsmiddelværdierne for de fire direktivbundne tungmetaller i 2021 ligger langt under grænse- og målværdier. Arsen og nikkel ligger på omkring 10% og bly og cadmium ligger på omkring 1% af grænse- og målværdierne.

For nikkel, krom, jern, kobber, mangan og zink er der relativt stor forskel mellem årsmiddelværdierne ved gademålestationer sammenlignet med bybaggrund og landbaggrund. Dette viser betydningen af de lokale udledninger fra vejtrafikken. For arsen, bly, cadmium og vanadium er der mere ensartede årsmiddelværdier på målestationerne, hvilket viser, at de lokale kilder har mindre betydning, og at langtransport af luftforureningen betyder relativt meget.

Tabel 9.3 viser årsmiddelværdierne for den samlede mængde kviksølv på gas- og partikelform ved målestationen på Råö ved Gøteborg. Da de geografiske variationer i koncentrationerne af kviksølv er små, er disse koncentrationsniveauer vurderet til at være repræsentative for Danmark.

Tabel 9.2. Årsmiddelværdier i 2021 for de fire tungmetaller (As, Pb, Cd og Ni) omfattet af EU's fjerde datterdirektiv (EU, 2004) samt seks andre udvalgte tungmetaller. Tabellen angiver endvidere EU's grænse- og målværdier for årsmiddelværdier af arsen, bly, cadmium og nikkel. For gade- og bybaggrundsmålestationer angives værdierne som massen af tungmetaller i PM₁₀, mens det for landbaggrundsmålestationer er tungmetaller i TSP (Total Suspended Particulate matter).

	Arsen As ng/m ³	Bly Pb ng/m ³	Cadmium Cd ng/m ³	Nikkel Ni ng/m ³	Krom Cr ng/m ³	Jern Fe ng/m ³	Kobber Cu ng/m ³	Mangan Mn ng/m ³	Vanadium V ng/m ³	Zink Zn ng/m ³
Grænseværdi/målværdi	6	500	5	20						
<i>Gade (PM₁₀)</i>										
København, H.C. Andersens Boulevard	0,5	2,4	0,06	1,6	7,9	1526	50	17	2,1	31
Aarhus, Banegaardsgade	0,4	1,4	0,05	0,7	1,9	411	17	5,5	1,2	15
<i>Bybaggrund (PM₁₀)</i>										
København	0,3	1,5	0,05	0,7	0,9	202	5,5	3,6	1,5	9,1
<i>Landbaggrund (TSP)</i>										
Anholt	0,2	1,1	0,03	0,6	0,5	72	1,3	2,3	1,4	6,4
Risø	0,3	1,3	0,04	0,6	0,6	102	2,0	2,7	1,3	7,0

Tabel 9.3. Årsmiddelværdier for kviksølv på gasform og partikelform ved Råö, Gøteborg, Sverige. Målingerne er foretaget af Swedish Environmental Research Institute, Gøteborg (Nerentorp, 2023).

	Kviksølv, samlet gasform (ng/m ³)	Kviksølv, samlet partikelform (ng/m ³)
Råö, Gøteborg, Sverige	1,2	0,001

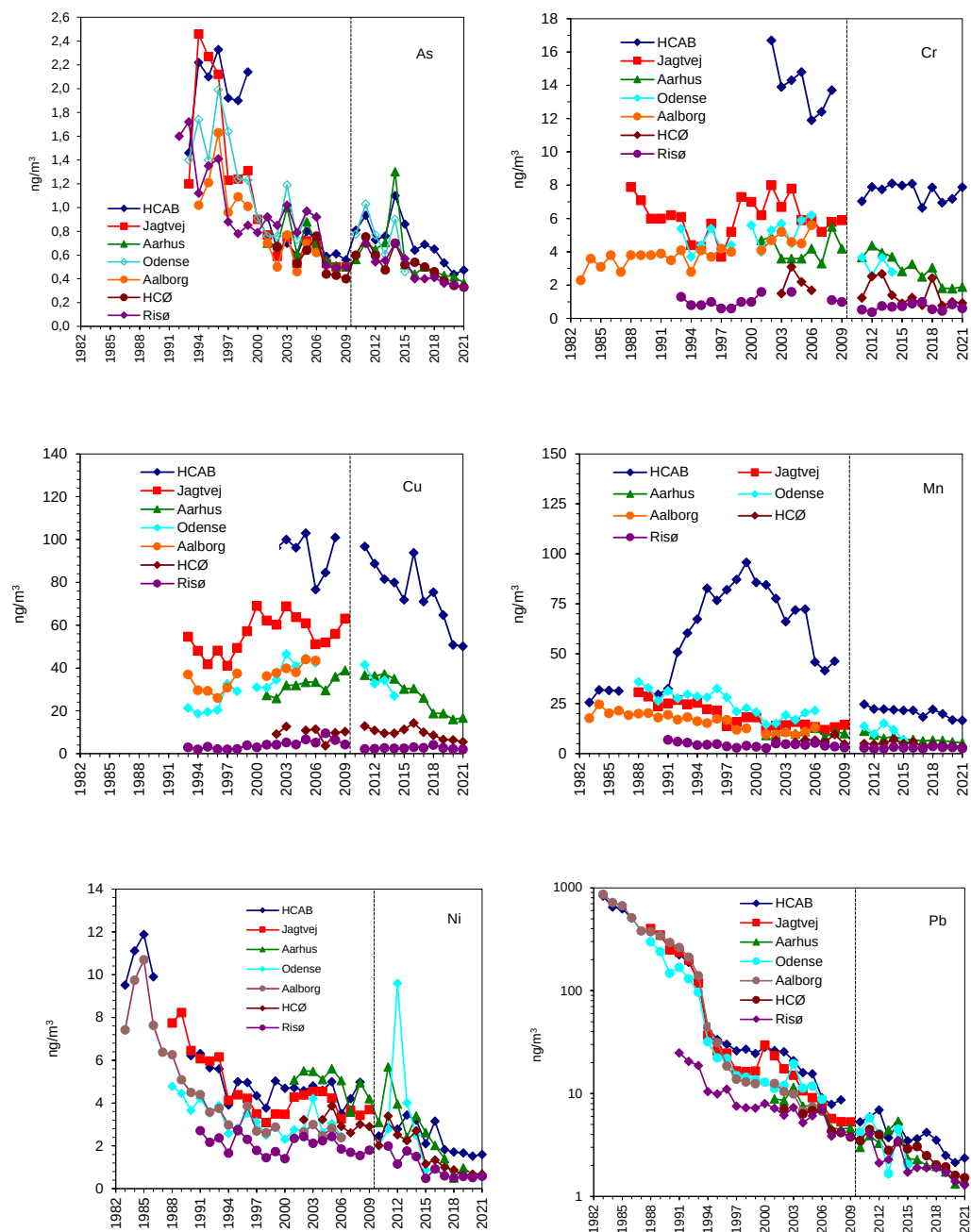
9.3 Udviklingstendens

Figur 9.3 viser udviklingen i luftkoncentrationerne af de udvalgte tungmetaller. Målingerne af krom, mangan, nikkel og bly blev begyndt allerede i 1983, mens tidsserierne for arsen og kobber er begyndt først i 1990'erne. Ved gade- og bybaggrundsmålestationerne blev målingerne til og med 1999 foretaget med opsamling af TSP, mens målingerne herefter er baseret på PM₁₀. Denne ændring vurderes ikke at have væsentlig betydning for hovedparten af de undersøgte stoffer, men for mangan kan der være en systematisk forskel med et skift mod mindre koncentrationer fra før til efter 1999. Forklaringen på dette er formentligt, at vejslid bidrager væsentligt til luftkoncentrationen af mangan, og at partikler fra vejslid generelt set består af store partikler, hvor diameteren kan være over 10 µm. Det store bidrag fra vejslid til luftkoncentrationen af mangan formodes også at være baggrunden for de ekstraordinært høje luftkoncentrationer for mangan på H.C. Andersens Boulevard (Figur 9.3), da vejbelægningen ud for målestationen frem til 2009 indeholdt slagger fra stålvalseværket i Frederiksværk (vejen blev nyasfaltert i 2009).

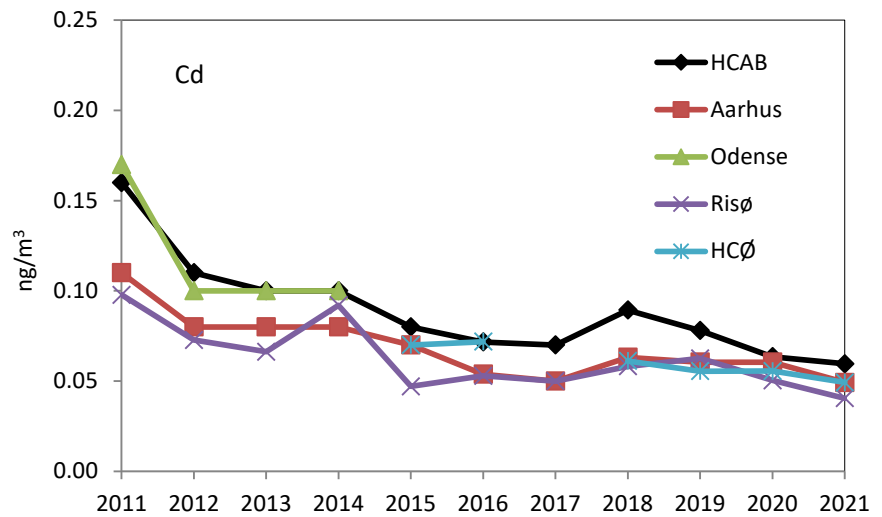
For hovedparten af stofferne er der sket et betydeligt fald i koncentrationerne. Mest markant for bly, hvor koncentrationen er faldet med mere end 99% siden 1982 på H.C. Andersens Boulevard. Arsen er faldet med omkring 75% siden 1990 og nikkel med omkring 75% siden 1982. Mangan er faldet med omkring 30% siden 1982, om end udviklingen er usikker grundet ovenstående omtalte ændringer i opsamlingsmetoden. Disse fald er i rimeligt god overensstemmelse med faldet i udledningerne (Figur 9.2).

For krom og kobber ses et mere komplekst billede. For kobber ses en tendens til en stigning i luftkoncentrationen frem til 2010, hvorefter der ses en tendens til et mindre fald. Dette er i store træk i overensstemmelse med udviklingen for udledningerne, som er steget jævnt siden 1990. For krom ses et nogenlunde jævnt niveau for mange af målestationerne med en tendens til et fald i de seneste år. Siden 1995 er der ikke sket væsentlig ændringer i den samlede udledning af krom (Figur 9.2) og udledningen fra vejtrafik har været svagt stigende siden 1990'erne (Nielsen et al., 2021). Der er derfor rimelig overensstemmelse mellem de målte ændringer og udviklingen i udledningerne. På H.C. Andersens Boulevard ses dog et noget anderledes forløb, hvor det store fald fra før 2009 til efter 2009 måske kan hænge sammen med slaggerne i den gamle asfalt lige som for mangan (se ovenfor).

Skift i analysemetode i 2010 gav en stor forbedring af analysekvaliteten for cadmium. Skiftet i analysemetoden gav imidlertid også et skift nedad i luftkoncentrationen, og det har dermed ikke været muligt at følge den langsigtede udviklingstendens for cadmium på samme måde som for de øvrige stoffer. Siden 2010 har der været en tendens til et fald i luftkoncentrationen (Figur 9.4). Koncentrationen ligger dog meget lavt set i forhold til detektionsgrænsen, så vurdering af tendens skal tages med forbehold for de lave koncentrationer og den relativt store usikkerhed på data.



Figur 9.3. Udviklingstendens for årsmiddelværdierne for seks udvalgte tungmetaller (As = arsen; Cr = krom; Cu = kobber; Mn = mangan; Ni = nikkel; Pb = bly). HCAB (H.C. Andersens Boulevard), Jagtvej, Aarhus, Odense og Aalborg er gademålestationer, mens HCØ er bybaggrund og Risø er landbaggrund. Til og med 1999 er det mængden af tungmetaller i TSP (Total Suspended Particulate matter), mens det herefter er tungmetaller i PM₁₀. For gademålestationen H.C. Andersens Boulevard (HCAB) skete skiftet mellem TSP og PM₁₀ dog først i 2006. Den stiplede streg angiver et skift i analysemetode fra PIXE-metoden (Proton Induced X-ray Emission) til ICPMS-metoden (Induced Coupled Plasma Mass Spectrometry). For de viste tungmetaller giver dette skift ingen konsekvenser. Bemærk at y-aksen er logaritmisk for bly. Målingerne standsede i 2015 ved Odense gademålestation og i 2009 på Jagtvej.



Figur 9.4. Udviklingstendens for årsmiddelværdierne for cadmium (Cd) siden 2011. HCAB (H.C. Andersens Boulevard), Aarhus og Odense er gademålestationer, HCØ er bybaggrundsmålestationen i København, og Risø er landbaggrund. For Risø er der tale om prøveopsamling af TSP (Total Suspended Particulate matter), mens det ved de andre målestationer er udført som prøveopsamling af PM₁₀. Denne forskel har ikke betydning for vurdering af udviklingstendensen.

10. Polycykliske aromatiske kulbrinter og benz[a]pyren

Polycykliske aromatiske kulbrinter (PAH; også kaldet tjærestoffer) er en gruppe stærkt kræftfremkaldende kemiske forbindelser, som i luften findes både på gasform og bundet til luftbårne partikler. Hovedkilden til udledningerne er forbrænding af forskellige former for brændstoffer, hvor brændefyring er den vigtigste.

De polycykliske aromatiske kulbrinter indgår i EU's fjerde datterdirektiv (2004), hvor der er fastlagt en målværdi (en slags grænseværdi) til beskyttelse af befolkningen mod helbredseffekterne som følge af langtidseksponering for benz[a]pyren. Benz[a]pyren anses for at være en af de vigtigste polycykliske aromatiske kulbrinter og betragtes som en form for indikator for den samlede eksponering for gruppen af kræftfremkaldende polycykliske aromatiske kulbrinter. Målværdien angiver, at årsmiddelværdien af benz[a]pyren ikke må overstige 1 ng/m³ for et kalenderår (EU, 2004). Det fjerde datterdirektiv stiller endvidere krav om overvågning af yderligere fem andre polycykliske aromatiske kulbrinter (benz[a]anthracen, benz[b]fluoranthren, benz[j+k]fluoranthren, indeno[1,2,3-cd]pyren og bibenz[a,h]anthracen).

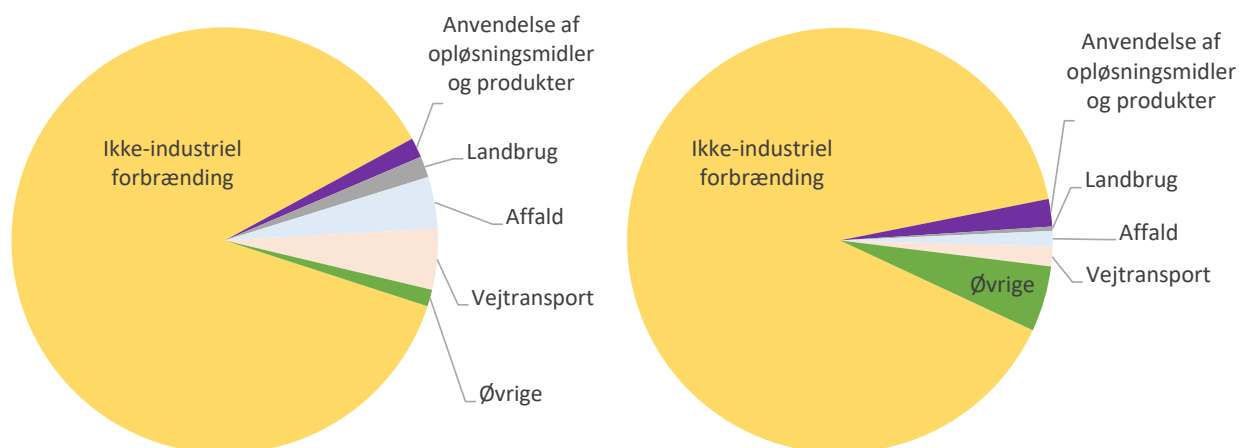
Status og udvikling i luftkoncentrationer af polycykliske aromatiske kulbrinter overvåges i 2021 ved målinger på en gademålestation i København (H.C. Andersens Boulevard) og på forstadsmålestationen i Hvidovre. Det er kun den partikelbundne del af disse polycykliske aromatiske kulbrinter som indgår i overvågningsprogrammet, men denne fase er også langt den vigtigste under danske udendørsforhold.

10.1 Udledninger

Opgørelser af udledningerne af benz[a]pyren viser, at ikke-industriel forbrænding er langt den vigtigste kilde (omkring 87%), og at anvendelse af brændefyring til boligopvarmning alene står for næsten trefjerdedele (omkring 76%) af de danske udledninger i 2020 (Figur 10.1 og tabel 10.1; Nielsen et al., 2022). De næst vigtigste kilder er vejtransport og affald, men disse kilder bidrager kun med til sammen omkring 9%.

Udledningen af benz[a]pyren i Danmark er faldet med omkring 58% set over hele perioden fra begyndelsen af 1990'erne til 2020 (Figur 10.2; Nielsen et al., 2022). Udviklingen i udledningen har dog været meget ujævn med en markant transient top i 2007, hvor udledningen næsten var på højde med udledningen fra begyndelsen af 1990'erne. Faldet i udledningen er for langt hovedparten opnået via forbedringer af brændeovne og brændekedler samt i de seneste år også ved et markant nedsat brændeforbrug. Ifølge Energistyrelsen er brændeforbrug faldet med 35% siden 2016 (Energistyrelsen, 2020).

For EU-27 er det også den ikke-industrielle forbrænding, som står for hovedparten af udledningerne (omkring 90%; Figur 10.1). For EU-27 er det øvrige kilder, vejtransport og affald, som er de næst vigtigste kilder. Udledningerne fra EU-27 er faldet med omkring 50% siden 1990, hvilket er lidt mindre end i Danmark (Figur 10.2). Igen er det faldet i udledningerne fra ikke-stationær forbrænding, som har haft størst betydning for faldet i de samlede udledninger.

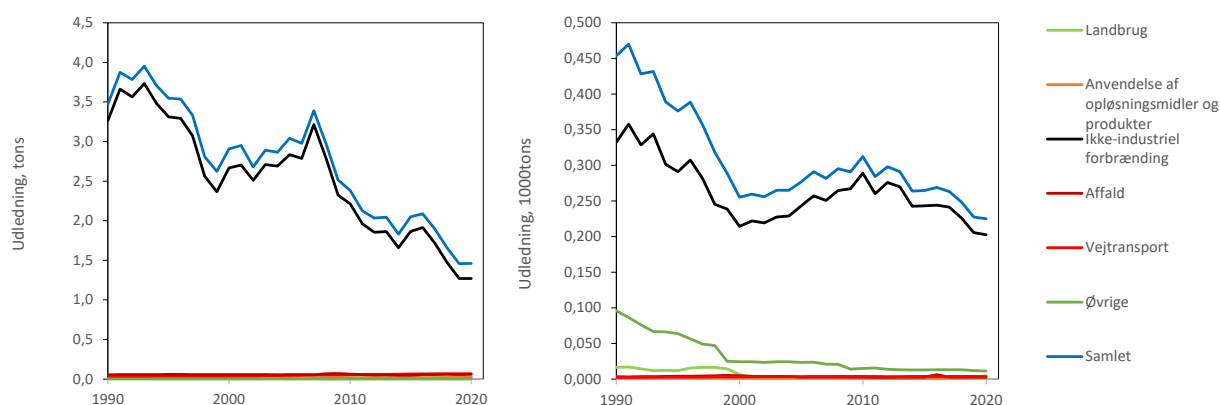


Figur 10.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af benz[a]pyren i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2020. Figureerne viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2022, CEIP, 2023).

Tabel 10.1. Kilderne til de menneskabte udledninger af benz[a]pyren i Danmark i 2020 (Nielsen et al., 2022). Kilderne er opgjort i 10 hovedkategorier med en yderligere underopdeling for "Ikke-industriel forbrænding" og "Vejtransport". Opdelingen er baseret på SNAP-koder (Selected Nomenclature for Air Pollution).

Kategori	SNAP-kode	Udledninger 2020	
		Tons	%
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	0,0	1
Ikke-industriel forbrænding	2	1,3	87
<i>Handel og service</i>	201	0,1	5
<i>Husholdninger</i>	202	1,1	76
<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	203	0,1	5
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	0,0	0
Industrielle processer	4	0,0	0
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	5	0,0	0
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	0,0	2
Vejtransport	7	0,1	5
<i>Udstødning</i>	701-706	0,1	4
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	0,0	0
Andre mobile kilder*	8	0,0	0
Affald	9	0,1	4
Landbrug	3b,d,f-i	0,0	2
Samlet		1,5	100

* Data inkluderer national søfart, al flyvning under 3000 fod, togtrafik, militær, fritidsfartøjer, fiskeri, og arbejdsredskaber indenfor landbrug, skovbrug, industri, handel/service og husholdninger.



Figur 10.2. Udviklingen i udledningerne af benz[a]pyren i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) siden 1990 (Nielsen et al., 2022; CEIP, 2023).

10.2 Status for luftkvalitet

Årsmiddelværdierne for benz[a]pyren viser, at EU's målværdi bliver overholdt ved de to målestationer (Tabel 10.2), og endda med god margen. I 2021 var koncentrationerne af benz[a]pyren omtrent lige høje om end koncentrationerne var lidt højere ved målestationen i Hvidovre (Figur 10.3). De generalt højere værdie ved målestationen i Hvidovre sammenlignet med målestationen ved H.C. Andersens Boulevard skyldes hovedsageligt, at målestationen i Hvidovre er placeret i et boligområde med en del anvendelse af brændefyring. I 2021 se over en faktor to i forskel på de to målestationer. Denne store forskel hænger sammen med, at målestationen i Hvidovre blev flyttet i 2021, og at er derfor mangler resultater fra juni-oktober. Det er hovedsageligt i vinterhalvåret, at brændefyring anvendes til boliovarmning, så derfor er de angivne værdier for 2021 højere end for et normalt år med fuld datadækning. Ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard kommer hovedparten af benz[a]pyren ligeledes fra brændefyring med et mindre bidrag fra den intense trafik på H.C. Andersens Boulevard.

For hovedparten af de øvrige polycykliske aromatiske hydrocarboner ses , at niveauet i Hvidovre er væsentligt højere i 2021 end 2020 (Ellermann et al., 2022) og dette skyldes ligeledes hovedsageligt flytningen af målestationen i Hvidovre i 2021 (Tabel 10.2).

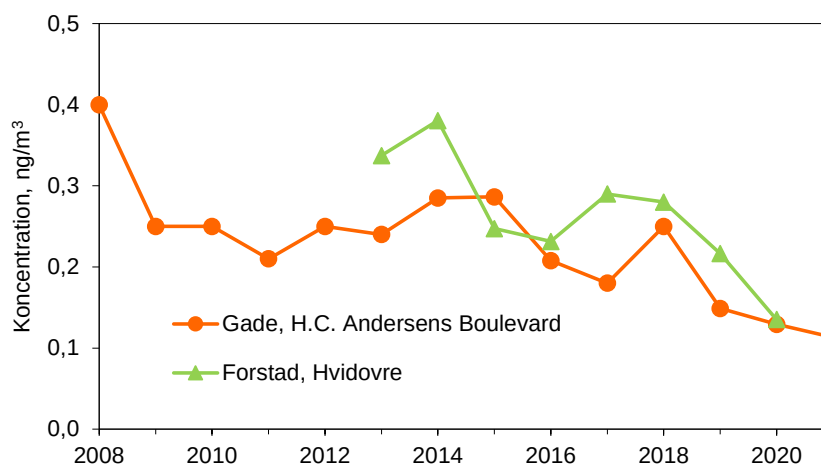
Tabel 10.2. Årsmiddelværdi for benz[a]pyren og fem udvalgte polycykliske aromatiske kulbrinter i 2021. Endvidere angives målværdi for årsmiddelværdien af benz[a]pyren (EU, 2004). Af analysetekniske årsager kan benz[b]fluoranthren og benz[k]fluoranthren ikke separeres og de angives derfor som en sum. Dette vil der blive rettet op på ved næste års rapportering. For målestationen i Hvidovre mangler data fra juni til oktober grundet flytning af målestationen.

	Benz[a]- pyren ng/m ³	Benz[a]- anthracen ng/m ³	Benz[b+k]- fluoranthren ng/m ³	Benz[j]- fluoranthren ng/m ³	Indeno[1,2,3- cd]-pyren ng/m ³	Dibenz[a,h]- anthracen ng/m ³
Målværdi	1					
<i>Gade</i>						
København, H.C. Andersens Boulevard	0,11	0,08	0,21	0,10	0,15	0,06
<i>Forstad</i>						
Hvidovre	0,25	0,18	0,50	0,16	0,29	0,06

10.3 Udviklingstendens

Figur 10.3 viser udviklingstendens for årsmiddelværdien af benz[a]pyren siden opstart af målingerne på H.C. Andersens Boulevard i 2007 og Hvidovre i 2013. For begge målestationer ses et fald. På H.C. Andersens Boulevard er årsmiddelkoncentrationen faldet med omkring 55% og ved forstadsmålestationen i Hvidovre ses et fald på omkring 62% siden 2013. Faldet i Benz[a]pyren på de to målestationer er i god overensstemmelse med faldet i de danske udledninger af benz[a]pyren, hvor der navnlig i de seneste år er set et relativt stort fald i udledningerne blandt andet som følge af et 35% fald i brændeforbrug siden 2016 (Energistyrelsen, 2020).

Ved begge målestationer ses også en del variationer fra år til år. Variation mellem årene skyldes hovedsageligt de naturlige variationer i de meteorologiske forhold, som påvirker selve udledningen, idet varme vintre fører til mindre udledninger og koldere vintre fører til øgede udledninger. De meteorologiske forhold påvirker også selve spredningen af forureningen i luften.



Figur 10.3. Udviklingstendens for årsmiddelværdierne for benz[a]pyren ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard og forstadsmålestationen i Hvidovre. Data for 2021 for målestationer i Hvidovre er udeladt grundet flytning af målestationen i 2021.

11. Den kemiske sammensætning af fine partikler

Partikelforureningen udgør den største andel af helbredseffekterne og derfor er det vigtigt at have kendskab til kilderne til partikelforureningen. Den kemiske sammensætning af partikelforureningen kan bidrage med nyttig viden om kilderne, hvilket er baggrunden for, at der i EU's luftkvalitetsdirektiv (EU, 2008) stilles krav om måling af den kemiske sammensætning af de fine partikler ($PM_{2,5}$) ved én baggrundsmålestation. EU's luftkvalitetsdirektiv angiver, at der skal analyseres for de vigtigste uorganiske ioner i de fine partikler (natrium, Na^+ ; klorid, Cl^- ; magnesium, Mg^{2+} ; ammonium, NH_4^+ ; nitrat, NO_3^- ; sulfat, SO_4^{2-} ; kalium, K^+ ; calcium, Ca^{2+}) elementært kulstof (EC) og organisk stof (OM).

I Kapitel 6 til 10 præsenteredes resultater for den samlede partikelmasse og resultater for udvalgte dele af den kemiske sammensætning af partikelforureningen. I dette kapitel sammenstiller vi denne viden med resultaterne fra måling af de vigtigste uorganiske ioner i de fine partikler. Disse udgør en vigtig del af den langtransporterede del af de fine partikler.

Som baggrund for præsentationen af resultaterne gives indledningsvis en kort introduktion til de luftbårne uorganiske ioner og kilderne til disse.

11.1 Kilderne til de uorganiske ioner

De uorganiske ioner i de luftbårne partikler stammer både fra menneskeskabte og naturlige kilder. Endvidere bliver nogle af dem udledt direkte på partikelform, mens andre dannes via de kemiske reaktioner i luften ud fra gasser udledt til luften. De direkte udledte betegnes primære partikler, mens dem der dannes i luften kaldes sekundære partikler. Følgende ioner indgår i måleprogrammet:

Primære

Natrium, klorid og magnesium: Hovedkilden til disse er havsprøjt. Saltning af veje om vinteren bidrager også med en mindre andel i navnlig byerne. Havsprøjt bidrager også til en mindre del af den luftbårne sulfat.

Kalium: De vigtigste kilder er ophvirvlet støv, og der er også et mindre bidrag fra forbrændingsprocesser.

Calcium: Calcium findes i stor mængde i sten, jord m.m., og støv herfra er en af de vigtigste kilder. På gadeniveau stammer en væsentlig del af calcium fra slitage af asfalt.

Sekundære

Sulfat: Svovldioxid omdannes via en række kemiske processer til luftbåren partikulært sulfat. De vigtigste udledninger er dermed forbrændingsprocesser, som er hovedkilderne til udledningerne af svovldioxid.

Nitrat: Kvælstofoxider omdannes ligeledes via de kemiske reaktioner i luften til luftbåren partikulært nitrat. De største kilder er forbrændingsprocesserne.

Ammonium: Ammonium dannes i luften, når ammoniak reagerer med sulfat og nitrat. Hermed dannes ammoniumsulfat og ammoniumnitrat, som findes på partikelform. Ammoniak og dermed også ammonium stammer for langt hovedparten fra landbrug, mens kun en mindre del er fra transportsektoren.

Sulfat, nitrat og ammonium betegnes samlet de "sekundære uorganiske ioner". Disse er kædet sammen via de kemiske reaktioner i luften, og der er stor korrelation mellem koncentrationerne af de tre ioner. Det tager typisk timer at få omdannet de udledte gasser til ammoniumsulfat og ammoniumnitrat, så derfor kommer disse luftforureningskomponenter ikke fra de lokale kilder. Tværtimod, så er opholdstiden i atmosfæren relativt lang for disse partikulære luftforureningskomponenter (dage til adskillige uger), og de kan derfor transporteres mange hundrede kilometer via luften.

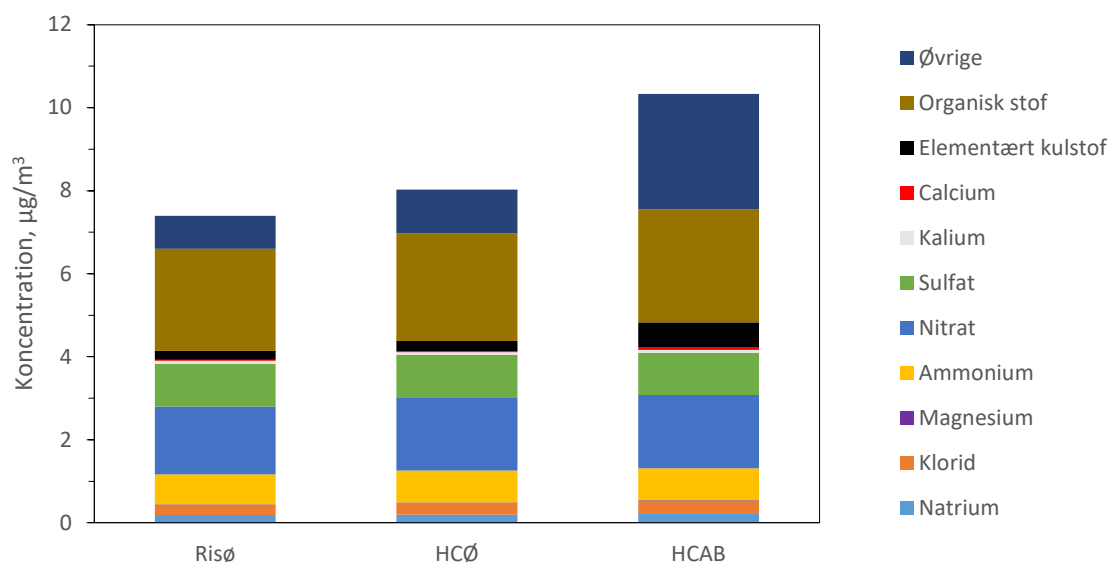
De uorganiske ioner i de fine partikler bliver overvåget med målinger foretaget på landbaggrundsmålestationen ved Risø. Frem til og med 2016 blev der også foretaget tilsvarende målinger ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard. Der var kun lille forskel mellem koncentrationerne målt på de to målestationer (Ellermann et al., 2017). Årsagen til dette er, at disse partikelkomponenter hovedsageligt er langtransporteret, hvilket er grunden til, at den geografiske variation mellem for eksempel by og land er lille. Det er derfor fagligt forsvarligt at benytte resultaterne fra Risø til at estimere koncentrationerne på gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard og bybaggrundsmålestationen i København (H.C. Ørsted Institut). Estimerne baseres på resultaterne fra perioden, hvor der var målinger på både Risø og H.C. Andersens Boulevard.

11.2 Status for 2021

Figur 11.1 og Tabel 11.1 viser den gennemsnitlige sammensætning af de kemiske komponenter i de fine partikler ved landbaggrundsmålestationen ved Risø, bybaggrundsmålestationen på H.C. Ørsted Institut og gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard. Årsmiddelværdierne for de uorganiske ioner er stort set ens på de tre målestationer og udgør omkring 53% af indholdet i de fine partikler på landbaggrundsmålestationen, 52% på bybaggrundsmålestationen og 41% på gademålestationen. De ensartede koncentrationsniveauer skyldes som nævnt tidligere, at de uorganiske ioner for langt størstedelen er langtransporteret via atmosfæren.

Elementært kulstof udgør kun en meget lille andel af de fine partikler i land- og bybaggrund (3%), mens det udgør 6% på gademålestationen, hvilket hænger sammen med de store bidrag fra vejtrafik. Organisk partikulært stof ligger på stort set samme niveau på de tre målestationer med kun en lille forøgelse på gademålestationen set i forhold til landbaggrundsmålestationen. Relativt set udgør organisk stof mellem 26% og 33% af den samlede mængde fine partikler (se Kapitel 8 for yderligere informationer om elementært kulstof og organisk stof).

Den resterende andel betegnet 'øvrige' dækker de komponenter for hvilke, der ikke foretages analyser i de fine partikler (nogle af dem måles i PM₁₀, men der foreligger ikke tilstrækkelig viden til at ekstrapolere til indholdet i fine partikler). Det forventes, at de øvrige partikelkomponenter består af vand associeret med uorganiske ioner, metaller og tungmetaller, karbonat, uopløselige mineraler og jordstøv (for eksempel sand) og en meget lille andel polycykliske aromatiske kulbrinter.



Figur 11.1. Årsmiddelkoncentrationer for de kemiske komponenter i de fine partikler ($PM_{2,5}$) ved landbaggrundsmålestationen ved Risø, bybaggrundsmålestationen på H.C. Ørsted Institut og gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard i 2021. For bybaggrundsmålestationen og gademålestationen er data for en stor del baseret på estimater. De estimerede koncentrationer fremgår af Tabel 11.1. Kategorien Øvrige omfatter de kemiske komponenter, som der ikke bliver lavet analyser for.

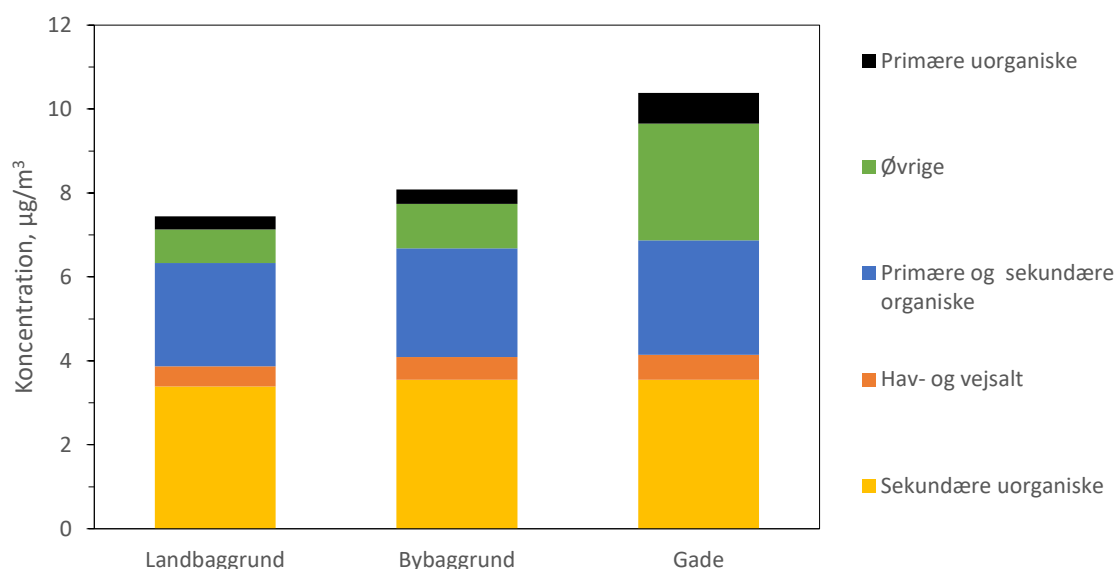
Tabel 11.1. Årsmiddelkoncentrationer for de kemiske komponenter i de fine partikler ($PM_{2,5}$) ved landbaggrundsmålestationen ved Risø, bybaggrundsmålestationen på H.C. Ørsted Institut og gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard i 2021. Til sammenligning vises den samlede mængde fine partikler ($PM_{2,5}$). For bybaggrundsmålestationen og gademålestationen er data for en stor del baseret på estimater. De estimerede koncentrationer er vist med rødt i tabellen. Øvrige omfatter de kemiske komponenter, som der ikke analyseres for.

	Landbaggrund Risø µg/m3	Bybaggrund HCØ µg/m3	Gade HCAB µg/m3
$PM_{2,5}$	7,4	8,0	10,3
Natrium	0,19	0,20	0,21
Klorid	0,23	0,27	0,31
Magnesium	0,02	0,02	0,02
Ammonium	0,73	0,8	0,8
Nitrit	1,6	1,8	1,8
Sulfat	1,0	1,0	1,0
Kalium	0,07	0,07	0,07
Calcium	0,02	0,02	0,07
Elementært kulstof	0,22	0,24	0,6
Organisk stof	2,5	2,6	2,7
Øvrige	0,8	1,1	2,8

For at få et bedre overblik over kilderne til de kemiske komponenter, så er der lavet en inddeling i følgende grupper:

- Hav- og vejsalt - naturlige bidrag fra havsalt samt bidrag af luftbåren salt som følge af saltning af veje om vinteren.
- Primære uorganiske – direkte udledte partikelkomponenter bestående af elementært kulstof, kalium, og calcium.
- Sekundære uorganiske – uorganiske partikelkomponenter (sulfat, nitrat og ammonium) dannet kemisk i atmosfæren ud fra udledninger af ammoniak, svovldioxid og nitrogenoxider.
- Primære og sekundære organiske – organisk stof, hvor det ikke med de nuværende analysemetoder er muligt at opdele mellem primære og sekundært dannede partikelkomponenter.
- Øvrige – de dele af PM_{2,5}, der ikke laves målinger for i de fine partikler, herunder vand associeret med de uorganiske ioner, metaller og tungmetaller, karbonat, uopløselige mineraler og jordstøv (for eksempel sand) og en meget lille andel polycykliske aromatiske kulbrinter.

Figur 11.2 og Tabel 11.2 viser de kemiske komponenter opdelt i forhold til ovenstående grupper. De sekundære uorganiske partikelkomponenter udgør den største andel (34-46%; størst andel i landbaggrund og lavest i gade), og der er lille forskel mellem de tre målestationer, hvilket skyldes, at langtransporterede komponenter udgør de væsentligste bidrag. Hav- og vejsalt (6-7%), de primære og sekundære organiske partikelkomponenter (26-33%) og gruppen af øvrige partikelkomponenter (11-27%) viser også en jævn fordeling mellem målestationerne, hvilket er tegn på en høj grad af langtransport og lille indflydelse fra de lokale kilder. De primære uorganiske partikelkomponenter udgør til gengæld en væsentlig større andel på gademålestationen (7%) end i landbaggrund og bybaggrund (begge omkring 4%). Elementært kulstof, som for en stor dels vedkommende stammer fra vejtrafik, udgør hovedparten af de primære uorganiske partikelkomponenter, hvilket er årsagen til den markant højere værdi på H.C. Andersens Boulevard.

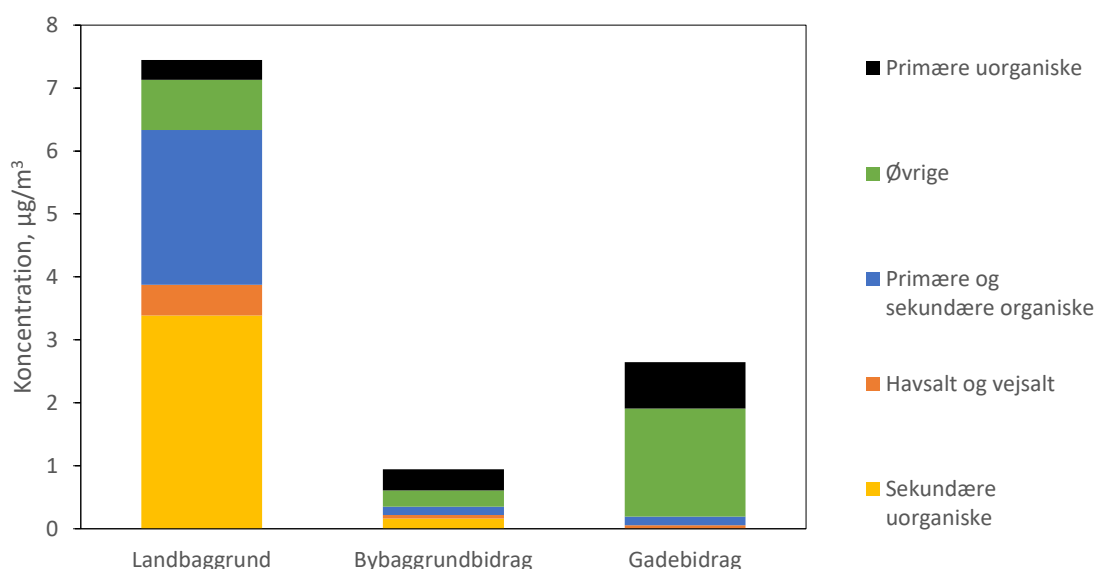


Figur 11.2. Årsmiddelkoncentrationer for de kemiske komponenter opdelt i grupper ved landbaggrundsmålestationen ved Risø, bybaggrundsmålestationen på H.C. Ørsted Instituttet og gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard i 2021. For bybaggrundsmålestationen og gademålestationen er data for en stor del baseret på estimater. De estimerede koncentrationer fremgår af Tabel 11.2.

Tabel 11.2. Årsmiddelkoncentrationer for de kemiske komponenter opdelt i grupper ved landbaggrundsmålestationen ved Risø, bybaggrundsmålestationen på H.C. Ørsted Instituttet og gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard i 2021. Til sammenligning vises også den samlede mængde fine partikler (PM_{2,5}). For bybaggrundsmålestationen og gademålestationen er data for en stor del baseret på estimater (se Tabel 11.1).

	Landbaggrund Risø µg/m3	Bybaggrund HCØ µg/m3	Gade HCAB µg/m3
PM _{2,5}	7,4	8,0	10,3
Hav- og vejsalt	0,49	0,54	0,60
Primære uorganiske	0,31	0,34	0,7
Sekundære uorganiske	3,4	3,5	3,5
Primære og sekundære organiske	2,5	2,6	2,7
Øvrige	0,8	1,1	2,8

Figur 11.3 præsenterer resultaterne for bidragene fra landbaggrund, bybaggrund og gade til den samlede mængde af fine partikler ved H.C. Andersens Boulevard. Landbaggrund udgør langt den største andel og for gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard er omkring 72% fra landbaggrund, mens bybaggrund og gadebidrag står for henholdsvis omkring 6% og 22%. De sekundære uorganiske partikelkomponenter, hav- og vejsalt, primære og sekundære organiske partikelkomponenter kommer overvejende fra landbaggrund. Den største del af gruppen af øvrige partikelkomponenter ses ved landbaggrund, hvilket kunne hænge sammen med, at indholdet af vand i partiklerne primært er associeret med gruppen af hydrofile uorganiske ioner. De primære uorganiske partikelkomponenter (navnlig elementært kulstof) bidrager mest til gadebidraget, hvilket igen stemmer med det store bidrag fra vejtrafik. De primære uorganiske partikelkomponenter udgør således omkring 17% af gadebidraget til partikelforureningen ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard.



Figur 11.3. Årsmiddelmålinger i 2021 for de kemiske komponenter i de fine partikler ved H.C. Andersens Boulevard opdelt i forhold til om de kommer fra landbaggrund, bybaggrundsbidraget eller gadebidraget. Bybaggrundsbidrag er beregnet ud fra forskel mellem resultaterne for bybaggrundsmålestationen (H.C. Ørsted Institut) og landbaggrundsmålestationen (Risø) og gadebidrag er beregnet ud fra forskel mellem gademålestationen (H.C. Andersens Boulevard) og bybaggrundsmålestationen. Der indgår en række estimater, som baggrund for de viste tal (se Tabel 11.1).

Luftkoncentrationerne af fine partikler lå i 2021 på niveau med 2020 (kapitel 7), men der er noget forskel for de forskellige kemiske komponenter. Størst ændring ses for hav- og vejsalt, som er faldet med omkring 25%, og der er sket et fald på 5-19 % for de primære uorganiske komponenter (primært elementært kulstof). For de sekundære uorganiske ioner er på niveau med 2020 og der er sket mindre stigning i koncentrationerne for de primære og sekundære uorganiske og de øvrige kemiske komponenter. Ændringerne fra 2020 til 2021 skyldes hovedsageligt variationerne i de meteorologiske forhold fra år til år.

12. Helbredseffekter og samfundsmæssige omkostninger relateret til luftforurening

Ifølge WHO er luftforurening nu anset for at være verdens største enkeltstående miljørelaterede sundhedsrisiko. Omkring 4.2 millioner mennesker døde for tidligt i 2016 som følge af eksponering for udendørs luftforurening (WHO, 2021b). Nyere forskning tyder dog på, at antallet af for tidlige dødsfald, som følge af udendørs luftforurening snarere er knapt 9 millioner mennesker for 2015 globalt set (Burnett et al., 2018; Lelieveld et al., 2019). Denne omfattende effekt af luftforurening på den menneskelige sundhed er årsagen til, at modelberegninger af helbredseffekter af luftforurening og tilhørende omkostninger i Danmark er en del af Delprogram for luft under NOVANA.

Der er foretaget en række modelberegninger til dette års afrapportering af NOVANA med henblik på at kvantificere bidraget fra de forskellige udledningssektorer til luftforureningen i Danmark for 2021. Beregningerne er gennemført for 2021 på basis af meteorologiske data for 2021, udledningsdata for 2020 for Danmark og udledningsdata for 2019 for Europa, hvilket svarer til de senest opdaterede datasæt på det tidspunkt, hvor beregningerne er gennemført. Modelberegninger er gennemført med modelsystemet EVA_v7.1, som er en integreret del af multi-skala modelsystemet DEHM/UBM til beregning af luftforurening og konsekvenser heraf. EVA_v7.1 giver mulighed for at kvantificere bidraget fra internationale, regionale, nationale og lokale kilder til luftforurening, og dermed også til effekterne af luftforurening på menneskelig sundhed. For flere detaljer om EVA_v7.1 systemet, se kapitel 1.5. EVA_v7.1 er en revideret version af EVA_v5.2, hvor informationer om opdateringer af eksponerings-responsrelationer fra WHO's air quality guidelines (WHO, 2021a) samt opdateringer i danske sundhedsdata og middellevetid af den danske befolkning er medtaget. Beregningerne er udført ved, at der først er gennemført modelberegninger for alle kilder, og dernæst modelberegninger, hvor udledningerne fra hver enkelt udledningssektor er reduceret, en ad gangen, med 30% både for Danmark og Europa. Bidraget fra den enkelte udledningssektor er så beregnet ud fra forskellen mellem luftkoncentrationerne, når alle kilder er inkluderet, og luftkoncentrationerne, når den pågældende sektors og det pågældende områdes (Danmark eller Europa) kilder er reduceret med 30% i beregningerne og derefter skaleret op til 100% (se næste afsnit). For international skibstrafik og naturlige kilder er reduktionen foretaget for hele modelområdet, som omfatter den nordlige halvkugle.

Den specifikke procentsats, der vælges til reduktion af emissionerne, er et kompromis imellem, om man ønsker at studere en marginal ændring, eller om man ønsker at vide, hvor meget den enkelte emissionssektor reelt bidrager til helbredseffekterne og de relaterede omkostninger. For at beregne det totale bidrag fra en emissionssektor, som repræsenterer det scenario, at den enkelte emissionssektor ikke er til stede, kan en 100% reduktion vælges. Da sammenhængen mellem emissionsreduktioner og luftkoncentrationer imidlertid ikke er lineær (pga. ikke-lineær atmosfærekemi) vil størrelsen af procentsatsen have indflydelse på resultatet. En 100% reduktion vil i nogle tilfælde give anledning til store ændringer, som ikke er skalérbare til marginale emissionsreduktioner. De 30% er valgt ud fra en betragtning af, at når vi analyserer danske udledningssektors bidrag til helbredseffekter og

omkostninger i Danmark, så er en 30% reduktion et marginalt bidrag, da det kun påvirker den generelle kemiske sammensætning i atmosfæren i mindre grad, mens en 30% reduktion også er et tilstrækkeligt stort bidrag til, at signalet i modellerne er tydeligt, selv for de mindre emissionssektorer. Følsomhedsstudier viser, at der kan være op til 20% forskel i den atmosfæriske koncentration, afhængig af om de danske emissionssektorer bliver reduceret med 30% eller 100%.

Den samme procentsats er anvendt for de udenlandske kilder. Når en hel europæisk udledningssektor reduceres med 30%, har det noget større betydning for den samlede atmosfærekemi, som helt grundlæggende er ikke-lineær, og dette har i nogen udstrækning betydning for resultaterne, der viser, hvor stort det totale bidrag er fra de udenlandske emissionssektorer til Danmark. Hvis udledningsreduktionen er relativt stor, vil ligevægten i baggrundskemien forandre sig sådan, at en reduktion af udledningerne i modellerne vil påvirke kemien, og dette vil i sig selv være medbestemmende for, hvor stort bidraget fra den pågældende sektor vil blive (en slags feedback, som både kan være positiv og negativ). Dette gælder specielt for de udenlandske kilder, hvor en hel sektor i Europa er reduceret, en ad gangen. Den ikke-lineære atmosfærekemi er velbeskrevet i modellerne, så der er ikke tale om en usikkerhed i beskrivelsen af processerne til grund for beregningerne, men i stedet at resultaterne afhænger af, hvilke slags scenarier for reduktion af emissioner, man vælger. Ideelt kunne man vælge at foretage emissionsreduktionsberegninger for f.eks. 10 forskellige reduktioner for hver sektor med f.eks. 10% forskel i hver reduktion (mellem 10% og 100%), men dette ville tilsvarende forøge antallet af (ressourcekrævende) beregninger med en faktor 10.

I det følgende er modelsystemet DEHM/UBM benyttet til at beregne bidragene til luftkoncentrationerne for forskellige stoffer fra danske og europæiske kilder opdelt på forskellige emissionssektorer i henhold til den opdeling, der anvendes internationalt og i de danske udledningsopgørelser; Selected Nomenclatur for Air Pollution (SNAP). Desuden er bidragene fra international skibstrafik og naturlige kilder fra hele den nordlige halvkugle beregnet. Med udgangspunkt i beregningerne af kildeopsplitning på luftkoncentrationer, er der udført beregninger med EVA7.1 modelsystemet, som muliggør adskillelse af helbredseffekterne og relaterede omkostninger fra danske og øvrige europæiske kilder, samt international skibstrafik og naturlige kilder. International skibstrafik og naturlige kilder fylder relativt meget i forhold til de øvrige udledninger. Eksempelvis bidrager naturlige kilder i Europa relativt mere til ozonkoncentrationen i Danmark, i forhold til andre europæiske menneskabte kilder, hvilket primært skyldes udledninger af flygtige organiske forbindelser (VOC'er) fra vegetation (f.eks. skove).

Afsnit 12.1 og 12.2 giver et overblik over status og trends med hensyn til helbredseffekter og relaterede omkostninger. I afsnit 12.3 er den detaljerede kildeopgørelse til helbredseffekter vist og afsnit 12.4 omhandler tilsvarende de relaterede omkostninger. Usikkerheder er diskuteret i afsnit 12.5, der også indeholder resultater af en sensitivitetsanalyse for mortalitetsdelen af beregningerne.

Helbredseffekter, som følge af luftforurening, er primært associeret med eksponering for fine partikler ($PM_{2.5}$), kvælstofdioxid, svovldioxid og ozon. Af disse komponenter, er $PM_{2.5}$, kvælstofdioxid og ozon de tre, som oftest analyseres i studier af luftforureningens omkostninger, da effekten af disse tre komponenter er dominerende, sammenlignet med effekten af svovldioxid

og andre komponenter. Atmosfæriske partikler betragtes som ansvarlige for dødelighed og sygelighed relateret til luftforurening, primært via hjertekarsygdomme og luftvejslidelser. Indtil 2020, var et review skrevet af Hoek et al. (2013) den mest omfattende analyse af de effekter på hjerte, kar og luftveje, der er fundet i studier af langtidseksponering, og Hoek et al. konkluderer, at den relative risiko for at dø for tidligt som følge af langtidseksponering for partikler er 6,2% per 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ stigning i $\text{PM}_{2,5}$. Denne relative risiko (som WHO også tidligere har anbefalet at anvende i relation til estimering af helbredseffekter fra luftforurening (WHO, 2013)) er anvendt i EVA5.2-systemet i tidligere rapporter.

I efteråret 2020 fremkom et nyt systematisk review/meta-analyse af Chen and Hoek (2020) bestilt af WHO, hvor det på baggrund af en række større internationale studier konkluderes, at det bedste estimat for den relative risiko for at dø for tidligt, er 8% per 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ stigning i $\text{PM}_{2,5}$ – en stigning i forhold til den tidligere værdi. I september 2021 publicerede WHO en samlet gennemgang af dette og andre meta-reviews vedrørende $\text{PM}_{2,5}$, og herunder drøftes et estimat for en nedre tærskelværdi hvorunder der ikke er sikker evidens. Det nyeste meta-review citeret i WHO-rapporten af Burnett et al (2018) påviser dog evidens ned til en tærskel på 2,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

I denne rapport er disse nye vurderinger for $\text{PM}_{2,5}$ – tillige med nye vurderinger for NO_2 – implementeret i EVA-systemet, som nu er version EVA7.1. Alle de nye tiltag påvirker beregningerne af for tidlige dødsfald, både som følge af korttids- og langtidseksponering, og både i opadgående og nedadgående retning. Eksponeringen er ud fra et forsigtighedsprincip opgjort uden hensyn til mulig nedre tærskelværdi, se nærmere om dette i afsnit 12.5 nedenfor.

Modeller, der beskriver luftforurening, har en tendens til at underestimere koncentrationen af $\text{PM}_{2,5}$, når man sammenligner modellernes resultater med målinger. I international litteratur benævnes dette som "the mass closure problem" eller "missing mass problem". I takt med, at forskningen udvikler sig og modellerne bliver bedre, reduceres dette massegab langsomt. I forbindelse med beregningerne af helbredseffekter og omkostninger, er det imidlertid en udfordring, da en stor del af effekterne oppebæres som følge af eksponering for partikler, og hvis modellerne løbende bliver bedre og bedre til at beskrive partiklerne, så vil modelberegningerne i samme takt vise stigende helbredseffekter og omkostninger, også selvom udledninger viser en nedadgående tendens. Sandsynligvis består en stor del af den "manglende masse" af vand i partiklerne, og den del er således ikke sundhedsskadelig, men da sammenhængen til dødelighed og sygelighed er fundet ud fra den totale masse af $\text{PM}_{2,5}$ (inkl. vand) i epidemiologiske studier, er det vigtigt at inkludere et estimat for den manglende masse for at give et så realistisk estimat for den totale dødelighed og sygelighed som muligt.

Der er gennem de seneste år gjort forskellige forsøg på at korrigere for den manglende masse i forbindelse med beregninger af helbredseffekter og omkostninger med lidt forskelligt udgangspunkt. I forbindelse med sidste års afrapportering har vi indført en mere grundlæggende ekstra analyse af, hvor stor den procentuelle forskel er mellem målinger og modelberegninger, når så mange tilgængelige målinger som muligt inkluderes. Resultatet af analysen er, at $\text{PM}_{2,5}$ -koncentrationen beregnet med modellerne skal opjusteres med 33% for at matche målingerne. Dette tal er fremkommet på baggrund af årsmiddelværdier for årene 2017-2019 fra 8 målestationer i Danmark for $\text{PM}_{2,5}$ baseret på EU's referencemålemetode, og må derfor betegnes som robust. En

tilsvarende undersøgelse for perioden 2019-2021 har ikke givet anledning til at ændre på dette tal. I takt med, at modellerne bliver bedre, og derfor kommer nærmere på at lukke massegabene, vil denne procentuelle forskel blive opdateret på baggrund af aktuelle målinger og modelresultater med henblik på at sikre et mere konsistent billede af udviklingen i de samlede helbredseffekter og omkostninger. I rapporten her indgår den manglende PM_{2,5}-masse sammen med sekundære organiske og uorganiske partikler, samt havsalt under betegnelsen "Øvrig PM_{2,5}". Betegnelsen PPM_{2,5}, som også vil fremgå af tabellerne, indeholder den menneskeskabte del af de primært emitterede partikler, og består af mineralsk støv, black carbon og organisk stof. Den totale PM_{2,5} er summen af PPM_{2,5} og øvrig PM_{2,5}.

12.1 Status og trends for helbredseffekter

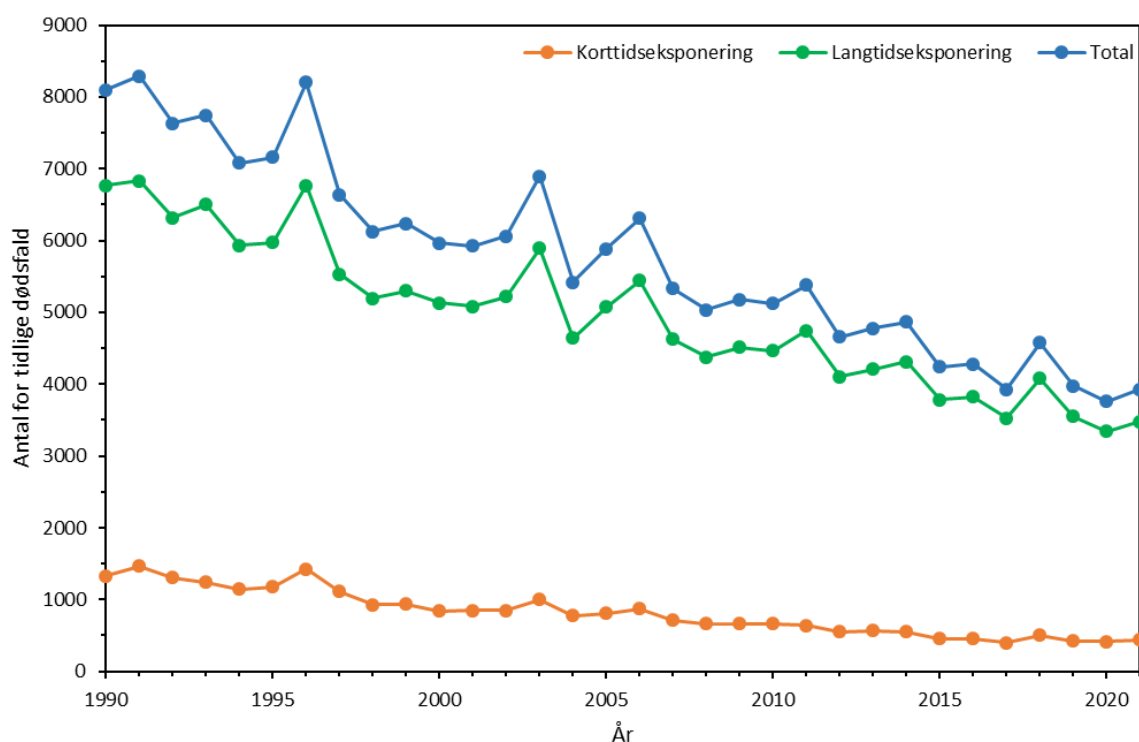
Tabel 12.1 viser resultatet af beregningen af helbredseffekter af luftforurening i Danmark med modelsystemet EVA7.1. Resultaterne er angivet for de forskellige helbredsudfald (både dødelighed og sygelighed), som er inkluderet i modelsystemet, og viser middelværdier for den treårige periode fra 2019-2021. Modelberegningerne inkluderer helbredseffekter af korttidseksponering for PM_{2,5}, kvælstofdioxid, ozon og svovldioxid, og langtidseksponeringen for PM_{2,5} og kvælstofdioxid. Antallet af tilfælde af for tidlig død som følge af langtidseksponering for luftforurening beregnes ud fra antallet af tabte leveår (Years Of Life Lost – YOLL) på basis af, at et tilfælde af for tidlig død i gennemsnit svarer til 11,4 tabte leveår (se Brandt et al., 2013a; b). Dette tal er opdateret fra de foregående års værdi (10,6) på baggrund af levetidstabeller opdateret med mortalitetsdata fra Danmarks Statistik for 2019.

Det samlede antal tilfælde af for tidlig død, som følge af luftforurening, beregnes til omkring 3.890 tilfælde i Danmark som årligt gennemsnit for 2019-2021 (Tabel 12.1). Helbredseffekten af eksponering for PM_{2,5} resulterer i omkring 3.740 tilfælde af for tidlig død, kvælstofdioxid resulterer i omkring 30 tilfælde af for tidlig død, eksponering for ozon i omkring 85 tilfælde og eksponering for svovldioxid i omkring 25 tilfælde af for tidlig død.

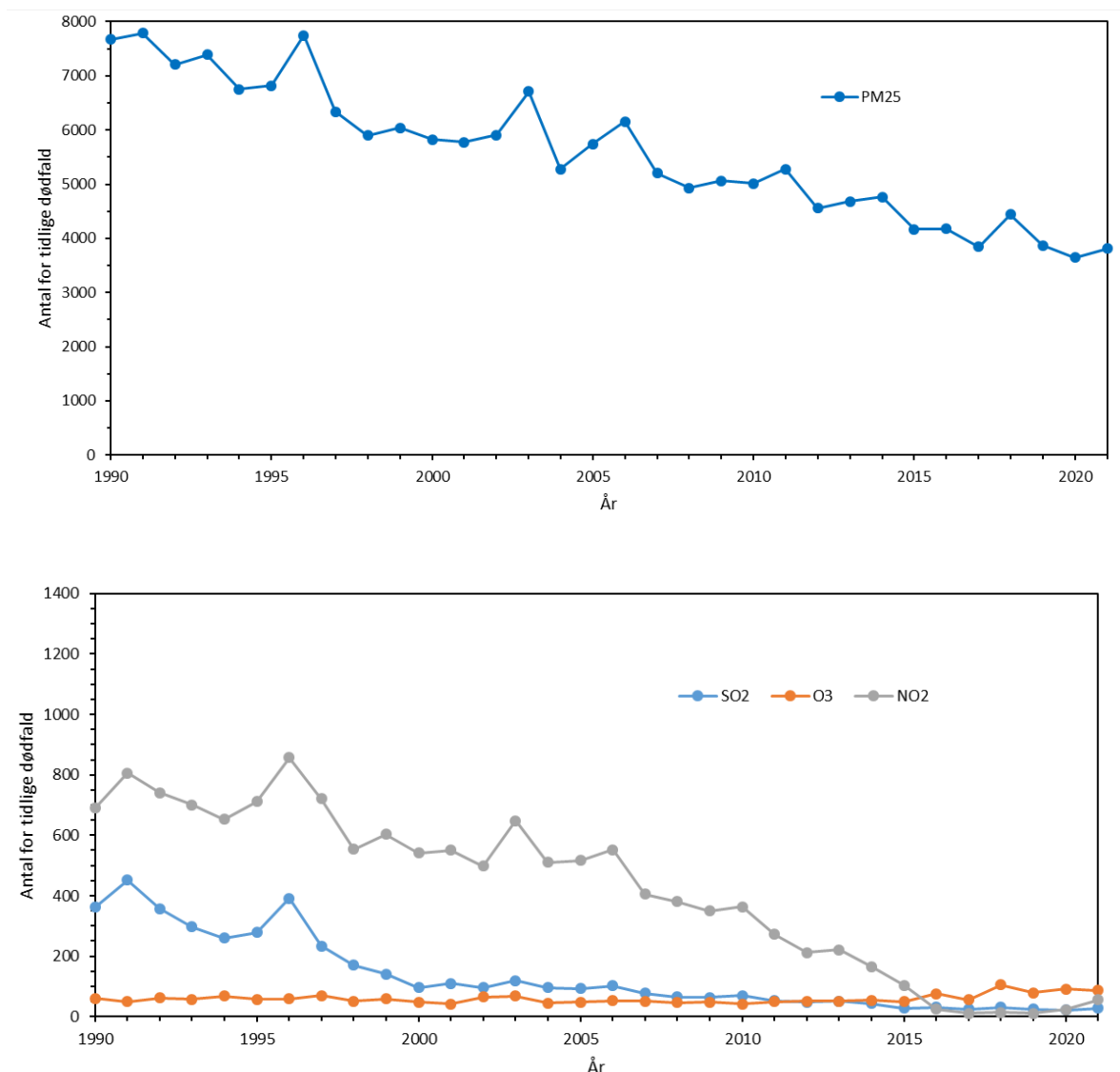
Tabel 12.1 Antal tilfælde af helbredseffekter som følge af luftforureningen i Danmark. Beregningerne er udført med EVA7.1 modelsystemet, og tallene angiver gennemsnittet for perioden 2019-2021 for hele Danmark opdelt på luftforureningskomponenterne svovldioxid (SO₂), ozon (O₃), kvælstofdioxid (NO₂), PPM_{2,5} (direkte udledte partikler), øvrig PM_{2,5}, og PM_{2,5} (sum af primær og øvrig PM_{2,5}).

Helbredseffekt	Antal tilfælde						Total*
	SO ₂	O ₃	NO ₂	PPM _{2,5}	Øvrig PM _{2,5}	PM _{2,5}	
For tidlig død (korttidseksposering)	25	85	14	57	245	302	427
For tidlig død (langtidseksposering)			15	646	2800	3440	3460
For tidlig død (total)	25	85	30	703	3040	3740	3890
Hospitalsindlæggelser, åndedrætsbesvær		127	1390	272	1170	1440	2960
Hospitalsindlæggelser, hjertekarsygdomme		413		190	818	1010	1420
Hoste børn				62	269	331	331
Kronisk bronkitis voksne				556	2390	2950	2950
Kronisk bronkitis børn				1980	12200	14200	14200
Tabte arbejdsdage				35100	152000	187000	187000
Dage med restriktioner i aktivitet				439000	1890000	2330000	2330000
Dage med mindre restriktioner i aktivitet		378000			0	0	378000
Lungekræft				88	382	470	470
Spædbarnsdød					0	0	0

*Bemærk at totalerne ikke nødvendigvis stemmer præcist med summen af de kemiske komponenter. Dette skyldes afrunding og beregning af middelværdi.



Figur 12.1. Det samlede antal tilfælde af for tidlige dødsfald som følge af den samlede luftforurening af PM_{2,5}, ozon (O₃) kvælstofdioxid (NO₂) og svovldioxid (SO₂) i Danmark, samt antal tilfælde fordelt på langtids- og korttidseksposering. Beregningerne er foretaget med EVA7.1.



Figur 12.2. Antal tilfælde af for tidlige dødsfald fordelt på luftforureningskomponenterne PM_{2,5} (øverst) og kvælstofdioxid (NO₂), ozon (O₃) og svovldioxid (SO₂) (nederst) i Danmark. Beregningerne er foretaget med EVA7.1.

Den vigtigste årsag til helbredseffekter er eksponering for PM_{2,5}, som i modelberegningerne i EVA-systemet omfatter følgende komponenter:

- Direkte emitterede partikler, hvilket inkluderer mineralsk støv, elementært kulstof (black carbon), organisk stof og havsalt fra havsprøjt.
- Sekundære uorganiske partikler hovedsageligt bestående af ammoniumsulfater ((NH₄)₂SO₄ og NH₄HSO₄) og ammoniumnitrat (NH₄NO₃).
- Sekundære organiske partikler dannet ud fra kemiske omdannelser af udledte flygtige organiske gasser (VOC – Volatile Organic Compounds).

Eksponering for PM_{2,5} er ansvarlig for omkring 96% af tilfældene af for tidlig død, ozon for omkring 2% og kvælstofdioxid og svovldioxid for hver omkring 1% som gennemsnit over de tre år fra 2019-2021. Kvælstofdioxid betyder relativt mindre, fordi de nye retningslinjer fra WHO indebærer en tærskelværdi på både korttids- og langtidseksponeringen i relation til for tidlige dødsfald.

Risikoen for de for tidlige dødsfald ved eksponering for luftforurening er relativt jævnt fordelt over Danmark, dog med en gradient fra syd til nord (højest risiko i syd) og en lidt højere risiko i de større byer. Årsagen til dette er, at PM_{2,5} er hovedansvarlig for tilfældene af for tidlig død. Den geografiske variation i koncentrationerne af PM_{2,5} består til dels af en syd til nord gradient, fordi størstedelen af PM_{2,5} kommer fra langtransport af luftforurening fra navnlig den nordlige del af det europæiske kontinent. Derudover er PM_{2,5} lidt højere i byerne, og kvælstofdioxidkoncentrationerne er højere i de større byer, hvilket samlet giver en lidt større risiko i for tidlig død i byerne (10-20%).

Udviklingstendensen for de for tidlige dødsfald som følge af både korttids- og langtidseksponering er beregnet for perioden 1990-2021 med EVA7.1 modelsystemet ved at gennemføre beregninger for hvert enkelt år i perioden. I figur 12.1 er denne udviklingstendens præsenteret, og det ses, at det samlede antal tilfælde af for tidlig død er faldet fra omkring 8.100 tilfælde per år i 1990 til omkring 3.900 tilfælde per år i 2021. Dette svarer til en reduktion på omkring 50%. Årsagen til dette fald er reduktionerne i koncentrationerne af luftforureningen (se blandt andet afsnit 2.3 og 7.3). Tallet i 2020 er desuden relativt lille (ca. 3.760 tilfælde) pga. covid-19-restriktionerne, både i Danmark og i Europa og den generelle reduktion i udledningerne. Variationer fra år til år skyldes desuden naturlige variationer i de meteorologiske forhold. Figur 12.2 viser udviklingstendenserne for antallet af for tidlige dødsfald fordelt på PM_{2,5}, kvælstofdioxid, ozon og svovldioxid. Ændringerne i antal tilfælde følger generelt ændringerne i luftkoncentrationerne.

Med modellerne i EVA7.1 systemet er det muligt at estimere, hvor stor en andel af helbredseffekterne relateret til luftforurening, der skyldes udledningerne i Danmark, og hvor stor en andel, der skyldes udlandets udledning. For den udenlandske andel, er det udledningerne i de europæiske lande, som spiller den største rolle, mens der er et mindre interkontinentalt bidrag. Tabel 12.2 viser, at kilder i udlandet for år 2021 er ansvarlige for omkring 2.910 for tidlige dødsfald (svarende til omkring 74%), mens de danske kilder er ansvarlige for omkring 1.010 for tidlige dødsfald (26%).

De danske udledning bidrager ikke alene til helbredseffekter i Danmark, men også til omkring 2.340 for tidlige dødsfald årligt i de øvrige europæiske lande i 2021. "Import" af helbredseffekter relateret til luftforurening er derfor omkring 24% større end "eksport" fra Danmark til de øvrige lande. Af resultaterne i tabellen ses også, at de danske udledning forårsager omkring 57% færre tilfælde af for tidlige dødsfald i Danmark (omkring 1.010) i forhold til, hvad de danske udledning forårsager i udlandet (omkring 2.340) grundet grænseoverskridende langtransport af luftforurening.

Tabel 12.2. Bidrag fra udledning i udlandet og Danmark til antal tilfælde af for tidlige dødsfald i Danmark og Europa. Beregningerne er foretaget med EVA7.1 modelsystemet for år 2021 (tallene er afrundet).

Bidrag	Antal tilfælde af for tidlig død	% af samlet
Samlet luftforurening i Danmark	3.930	100
Udlandets bidrag til Danmark	2.910	74
Danmarks bidrag til Danmark	1.010	26
Danmarks bidrag til Europa inkl. Danmark	3.350	100
Danmarks bidrag til Europa ekskl. Danmark	2.340	70

12.2 Status for luftforureningens omkostninger som følge af helbredseffekter

Tabel 12.3 viser de samlede årlige omkostninger som følge af helbredseffekter af luftforureningen i Danmark for år 2021.

De samlede omkostninger relateret til luftforurening i Danmark er estimeret til omkring 63 milliarder kr. for år 2021, hvilket er omkring 13 milliarder kr. mindre end for 2020. Den økonomiske værdisætning af forskellige helbredseffekter er her baseret på Andersen et al. (2019) og angivet i 2016-priser. Udviklingstendensen for de samlede omkostninger fra luftforureningen er meget lig udviklingstendensen for antal tilfælde af for tidlig død, så derfor er den ikke præsenteret her.

Den samlede helbredsrelaterede omkostning var omkring 152 milliarder kr. som middel over årene 1988-1990 (i 2016 priser), og den er dermed faldet med omkring 50%.

Tabel 12.3 viser også fordelingen af de helbredsrelaterede omkostninger på bidraget fra henholdsvis udledninger i udlandet og udledninger i Danmark. Bidraget fra udlandet estimeres til 46 milliarder kr. (73% af de samlede helbredsrelaterede omkostninger i Danmark), mens bidraget fra danske udledninger udgør omkring 17 milliarder kr. i Danmark (27%). Bidraget fra danske udledninger til luftforureningens helbredsrelaterede omkostninger i Europa eksklusiv Danmark er beregnet til omkring 38 milliarder kr.

Tabel 12.3. Bidrag fra udledninger fra udlandet til Danmark og bidraget fra udledninger i Danmark til de totale helbredsrelaterede omkostninger fra luftforurening, beregnet med EVA7.1 modelsystemet for år 2021.

Bidrag	Mia. DKK	% af total
Samlet luftforurening i Danmark	63	100
Udlandets bidrag til Danmark	46	73
Danmarks bidrag til Danmark	17	27
Danmarks bidrag til Europa inkl. Danmark	55	100
Danmarks bidrag til Europa ekskl. Danmark	38	69

12.3 Kilder til helbredseffekter af luftforureningen i Danmark i 2021

Tabel 12.4 viser helbredseffekterne fordelt på de forskellige luftforureningskomponenter, som giver anledning til de største helbredseffekter i Danmark. Tabellen svarer til tabel 12.1, men angiver udelukkende data for 2021, hvor tabel 12.1 angiver data for gennemsnittet af 2019-2021. Samlet set giver luftforureningen anledning til omkring 3.930 for tidlige dødsfald i 2021, med PM_{2,5} som den største bidragsyder (omkring 3.760 for tidlige dødsfald) og kvælstofdioxid som den næststørste (omkring 56 for tidlige dødsfald). Ozon bidrager med omkring 85 for tidlige dødsfald.

Tabel 12.4. Helbredseffekter i Danmark i 2021 beregnet med modelsystemet EVA7.1 som følge af den samlede luftforurening, dvs. både danske og udenlandske kilder. Total er summen af helbredseffekter af svovldioxid (SO₂), ozon (O₃), kvælstofdioxid (NO₂), primær PM_{2,5}, øvrig PM_{2,5}, PM_{2,5} (sum af primær og øvrig PM_{2,5}) og total.

Helbredseffekt	Antal tilfælde						Total
	SO ₂	O ₃	NO ₂	PPM _{2,5}	Øvrig PM _{2,5}	PM _{2,5}	
For tidlig død (korttidseksposering)	28	86	27	62	240	302	443
For tidlig død (langtidseksposering)			29	699	2750	3450	3480
For tidlig død (total)	28	86	56	761	2990	3760	3930
Hospitalsindlæggelser, åndedrætsbesvær		131	1490	293	1150	1440	3060
Hospitalsindlæggelser, hjerte-		427		205	801	1000	1430
Hoste børn				66	259	325	325
Kronisk bronkitis voksne				602	2350	2950	2950
Kronisk bronkitis børn				2100	11400	13500	13500
Tabte arbejdsdage				38000	150000	188000	188000
Dage med restriktioner i aktivitet				473000	1850000	2320000	2320000
Dage med mindre restriktioner i aktivitet		383000		0	0	0	383000
Lungekræft				96	376	472	472
Spædbarnsdød				0	0	0	0

Bidrag fra udenlandske og danske kilder til helbredseffekter i Danmark

Tabel 12.5 viser bidraget til helbredseffekter i Danmark fra de forskellige udenlandske og danske kilder for 2021 opdelt på SNAP-kategorier.

Danske kilder bidrager med i alt omkring 1.010 for tidlige dødsfald, hvoraf ikke-industriel forbrænding bidrager med ca. 368 for tidlige dødsfald, landbrug med ca. 220 for tidlige dødsfald og vejtrafik med ca. 217 for tidlige dødsfald, heraf ca. tre fjerdedele fra udstødning og ca. en fjerdedel fra ikke-udstødning. For hospitalsindlæggelser pga. åndedrætsbesvær er det udstødning fra vejtransport i Danmark, der er den største bidragsyder, mens for hospitalsindlæggelser for hjertekarsygdomme er det ikke-industriel forbrænding fra husholdninger i Danmark, der er den største bidragsyder. Danske kilder giver desuden anledning til over 519.000 sygedage (dage med restriktioner i aktiviteter).

Udenlandske kilder bidrager med i alt ca. 2.910 for tidlige dødsfald, hvoraf naturlige kilder og international skibsfart bidrager med henholdsvis omkring 982 og 617 for tidlige dødsfald. Landbrugssektoren i Europa (uden for Danmark) bidrager med omkring 577 for tidlige dødsfald i Danmark og vejtrafik bidrager med omkring 402, energiindustrien med ca. 178, ikke-industriel forbrænding med ca. 240, og fremstillingsvirksomhed og byggeri med ca. 254 for tidlige dødsfald i Danmark. Ikke-vejgående transport bidrager også væsentligt med omkring 103 for tidlige dødsfald i Danmark.

Summen af helbredseffekter fra alle kilder, både danske og udenlandske er angivet i tabel 12.5, sammen med antallet af helbredseffekter fra den totale luftforurening fra alle kilder samlet. De to tal giver ikke nødvendigvis det samme pga. ikke-lineære atmosfærekemiske processer. En forskel på op til 40-50% ses afhængigt af helbredseffekt. Især for helbredseffekter relateret til NO₂ (f.eks. for tidlig død som følge af korttidseksposering) og O₃ (f.eks. dage med mindre restriktioner i aktivitet) vil der være stor forskel, også fordi helbredseffekterne først kommer, når koncentrationen er over en vis tærskelværdi.

Tabel 12.6 viser de procentvise bidrag fra de enkelte udledningssektorer i Danmark og udlandet til helbredseffekter i Danmark.

Ikke-industriel forbrænding fra husholdninger (primært boligopvarmning med fast brændsel) i Danmark bidrager mest til antallet af for tidlige dødsfald (ca. 7,2% ud af det samlede antal fra alle kilder), efterfulgt af landbrug og vejtransport (begge ca. 4,8%). Vejtransport er opdelt i udledninger fra udstødning og udledninger, som ikke er relateret til udstødning (dæk-, bremse- og vejslid), hvor det ses, at bidraget fra udstødningsdelen er knap tre gange større end ikke-udstødningsdelen. Væsentlige bidragsydere er desuden ikke-vejgående transport med ca. 1,4% og kraftværker med ca. 1,5%. For dage med mindre restriktioner i aktivitet, er det vejtransport, der bidrager mest (-3,3%) dernæst ikke-vejgående transport (-1,1%) og kraftværker (-0,5%). Det bemærkes, at tallene er negative, hvilket vil sige, at disse sektorer bidrager til at mindske antallet af dage med mindre restriktioner i aktivitet. Dette skyldes, at denne effekt udelukkende er koblet til eksponering for ozon, og i dette tilfælde er det sektorer med relativt store udledninger af kvælstofoxider, der har indflydelse. De negative tal skyldes ikke-lineær kemi med betydning for dannelsen af ozon, hvor nogle udledninger bidrager til at mindske koncentrationen af ozon lokalt.

Der ses desuden et bidrag på ca. 10,8% fra vejtransport (udstødning) til hospitalsindlæggelser pga. åndedrætsbesvær. Denne sektor bidrager til gengæld negativt til hospitalsindlæggelser som følge af hjertekarsygdomme, som er baseret på eksponering af både $PM_{2,5}$ og ozon (dog kun med -0,7%). Største bidragsyder til hospitalsindlæggelser for hjertekarsygdomme er ikke-industriel forbrænding med ca. 6,7%. Hvis udledningen af kvælstofoxider er tilstrækkeligt stor, vil påvirkningen af ozon også påvirke dannelsen af hydroxylradikaler i atmosfæren, som igen har stor indflydelse på en række reaktionshastigheder for andre kemiske reaktioner i atmosfæren, herunder dannelsen af de sekundære uorganiske partikler, ammoniumsulfat og -nitrat, som bidrager væsentligt til den samlede koncentration af $PM_{2,5}$. Dannelsen af de sekundære partikler er således også påvirket af ikke-lineær atmosfærekemi.

Tabel 12.5. Danske og udenlandske kilders bidrag til helbredseffekter i Danmark i 2021 fordelt på udledningssektorer. Summen af alle kilder er givet sammen med helbredseffekterne fra den totale luftforurening. Differencen i % skyldes ikke-lineære atmosfærekemiske processer. Bemærk at totalerne ikke nødvendigvis stemmer præcist med summen af de kemiske komponenter, hvilket skyldes afrunding af de præsenterede tal.

SNAP	Emissionssektor	For tidlige dødsfald fra korttidseksponering (PM _{2,5} , SO ₂ , NO ₂ , O ₃)	For tidlige dødsfald fra langtidseksponering (PM _{2,5} , NO ₂)	Total antal for tidlige dødsfald (PM _{2,5} , SO ₂ , NO ₂ , O ₃)	Hospitalindlæggelser, åndedrætsbesvær (PM _{2,5} , NO ₂ , O ₃)	Hospitalindlæggelser, hjertekarsygdomme (PM _{2,5} , O ₃)	Hoste børn (PM _{2,5})	Kronisk bronkitis voksne (PM _{2,5})	Kronisk bronkitis børn (PM _{2,5})	Tabte arbejdsdage (PM _{2,5})	Dage med restriktioner i aktivitet (PM _{2,5})	Dage med mindre restriktioner i aktivitet (O ₃)	Lungekræft (PM _{2,5})	Dødsfald blandt spædbørn (PM _{2,5})
Danske kilder														
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	24	43	67	114	2	2	22	73	1390	17200	-2910	3	0,0
201	Ikke-industriel forbrænding	2	7	9	12	1	1	5	16	305	3850	-31	1	0,0
	Handel og service													
202	Ikke-industriel forbrænding	32	294	327	162	82	28	248	872	15700	196000	-1240	39	0,0
	Husholdninger													
203	Ikke-industriel forbrænding	3	28	32	16	8	3	24	83	1500	18600	271	4	0,0
	Land-, skovbrug og akvakultur													
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	17	22	40	46	3	2	14	45	892	11200	-912	2	0,0
4	Industrielle processer	7	26	34	12	9	3	23	76	1400	17800	1230	3	0,0
5	Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	1	5	5	2	2	0	4	12	247	3020	477	0	0,0
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	2	18	20	9	7	2	16	53	956	12400	1890	2	0,0
701-706	Vejtransport Udstødning	48	108	155	348	-9	5	50	163	3100	38900	-19300	8	0,0
707-708	Vejtransport Ikke-udstødning	5	56	62	24	17	6	50	174	3060	39200	359	8	0,0
8	Andre mobile kilder	18	55	73	131	2	4	34	114	2100	26300	-6040	5	0,0
9	Affald	7	18	25	10	6	2	16	52	971	12300	594	2	0,0
10	Landbrug	26	195	220	209	31	17	156	473	10000	123000	-1660	25	0,0
Europæiske og udenlandske kilder														
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	18	161	178	92	42	15	137	425	8710	108000	7160	22	0,0
2	Ikke-industriel forbrænding	23	217	240	112	63	21	186	611	11800	146000	11300	30	0,0
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	27	227	254	132	64	21	193	596	12300	152000	17800	31	0,0
4	Industrielle processer	7	52	59	22	28	5	45	148	2830	35000	11900	7	0,0
5	Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	4	15	18	8	14	2	13	40	816	10100	9180	2	0,0
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	7	11	18	9	31	1	10	33	634	7820	25700	2	0,0
7	Vejtransport	45	357	402	254	106	33	303	965	19300	238000	55800	48	0,0
8	Andre mobile kilder	12	91	103	66	28	9	77	249	4920	60700	14100	12	0,0
9	Affald	3	22	25	10	8	2	19	63	1210	15000	2430	3	0,0
10	Landbrug	55	522	577	260	113	49	445	1340	28300	350000	40300	71	0,0
-	International skibstransport	88	529	617	562	80	45	413	1330	26300	325000	13200	66	0,0
-	Naturlige kilder	155	827	982	608	636	48	693	5430	44800	512000	382000	113	0,0
	Sum alle kilder	635	3910	4550	3230	1380	326	3200	13500	204000	2480000	564000	509	0,0
	Total luftforurening	443	3480	3930	3060	1430	325	2950	13500	188000	2320000	383000	472	0,1
	Difference i % mellem sum af sektorer og total luftforurening	40	12	15	5	4	0	8	0	9	7	47	8	-142

Tabel 12.6. Danske og udenlandske kilders bidrag til helbredseffekter i Danmark i 2021 fordelt på udledningssektorer i %.

SNAP	Emissionssektor	For tidlige dødsfald fra korttidsseksponering (PM _{2,5} , SO ₂ , NO ₂ , O ₃)	For tidlige dødsfald fra langtidsseksponering (PM _{2,5} , NO ₂)	Total antal for tidlige dødsfald (PM _{2,5} , SO ₂ , NO ₂ , O ₃)	Hospitalindlæggelser, åndedrætsbesvær (PM _{2,5} , NO ₂ , O ₃)	Hospitalindlæggelser, hjertekarsygdomme (PM _{2,5} , O ₃)	Hoste børn (PM _{2,5})	Kronisk bronkitis voksne (PM _{2,5})	Kronisk bronkitis børn (PM _{2,5})	Tabte arbejdsdage (PM _{2,5})	Dage med restriktioner i aktivitet (PM _{2,5})	Dage med mindre restriktioner i aktivitet (O ₃)	Lungekræft (PM _{2,5})	Dødsfald blandt spædbørn (PM _{2,5})
Danske kilder														
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	3,8	1,1	1,5	3,5	0,2	0,7	0,7	0,5	0,7	0,7	-0,5	0,7	0,0
201	Ikke-industriel forbrænding	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0
202	Ikke-industriel forbrænding	5,1	7,5	7,2	5,0	6,0	8,5	7,8	6,5	7,7	7,9	-0,2	7,7	0,0
203	Ikke-industriel forbrænding	0,5	0,7	0,7	0,5	0,6	0,8	0,7	0,6	0,7	0,7	0,0	0,7	0,0
	Land-, skovbrug og akvakultur													
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	2,6	0,6	0,9	1,4	0,2	0,5	0,4	0,3	0,4	0,5	-0,2	0,4	0,0
4	Industrielle processer	1,2	0,7	0,7	0,4	0,6	0,8	0,7	0,6	0,7	0,7	0,2	0,7	0,0
5	Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	0,4	0,5	0,4	0,3	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,3	0,5	0,0
701-706	Vejtransport Udstødning	7,5	2,8	3,4	10,8	-0,7	1,6	1,6	1,2	1,5	1,6	-3,4	1,5	0,0
707-708	Vejtransport Ikke-udstødning	0,8	1,4	1,4	0,8	1,2	1,7	1,6	1,3	1,5	1,6	0,1	1,5	0,0
8	Andre mobile kilder	2,8	1,4	1,6	4,1	0,2	1,1	1,1	0,8	1,0	1,1	-1,1	1,0	0,0
9	Affald	1,0	0,5	0,6	0,3	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,1	0,5	0,0
10	Landbrug	4,0	5,0	4,8	6,5	2,2	5,3	4,9	3,5	4,9	5,0	-0,3	4,8	0,0
Europæiske og udenlandske kilder														
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	2,8	4,1	3,9	2,8	3,1	4,7	4,3	3,2	4,3	4,3	1,3	4,3	0,0
2	Ikke-industriel forbrænding	3,6	5,6	5,3	3,5	4,6	6,3	5,8	4,5	5,8	5,9	2,0	5,8	0,0
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	4,2	5,8	5,6	4,1	4,7	6,5	6,0	4,4	6,0	6,1	3,2	6,1	0,0
4	Industrielle processer	1,2	1,3	1,3	0,7	2,0	1,5	1,4	1,1	1,4	1,4	2,1	1,4	0,0
5	Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	0,6	0,4	0,4	0,2	1,0	0,5	0,4	0,3	0,4	0,4	1,6	0,4	0,0
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	1,1	0,3	0,4	0,3	2,3	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	4,6	0,3	0,0
7	Vejtransport	7,1	9,1	8,8	7,9	7,7	10,2	9,5	7,2	9,5	9,6	9,9	9,5	0,0
8	Andre mobile kilder	1,8	2,3	2,3	2,0	2,1	2,7	2,4	1,8	2,4	2,4	2,5	2,4	0,0
9	Affald	0,4	0,6	0,5	0,3	0,6	0,7	0,6	0,5	0,6	0,6	0,4	0,6	0,0
10	Landbrug	8,7	13,3	12,7	8,0	8,2	15,0	13,9	9,9	13,9	14,1	7,1	13,9	0,0
-	International skibstransport	13,9	13,5	13,6	17,4	5,8	13,9	12,9	9,9	12,9	13,1	2,3	13,0	0,0
-	Naturlige kilder	24,4	21,1	21,6	18,8	46,2	14,7	21,6	40,4	22,0	20,6	67,7	22,1	100,0
	Sum alle kilder	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

I Tabel 12.6 er desuden angivet de procentvise bidrag fra de forskellige udledningssektorer i udlandet til helbredseffekter i Danmark. Naturlige kilder i udlandet bidrager mest til helbredseffekter i Danmark sammenlignet med de øvrige udledningssektorer. Naturlige kilder bidrager f.eks. med omkring 19% til hospitalsindlæggelser grundet åndedrætsbesvær og med omkring 68% til dage med mindre restriktioner i aktivitet. Sidstnævnte er kun relateret til ozon, hvor der er et relativt stort bidrag fra naturlige kilder. Følgende naturlige kilder er inkluderet i modellen:

- havsalt (udledninger via havsprøjt),
- jordemissioner,
- udledninger af kvælstofoxider fra lyn,
- kvælstofoxider og primære PM_{2,5}-emissioner fra skovbrande,
- ammoniak fra havet,
- svovldioxid fra vulkaner,
- og flygtige organiske forbindelser (VOC) fra vegetation, som fungerer som forløbere for dannelse af ozon og sekundære organiske partikler (SOA).

International skibstrafik bidrager med omkring 12,6% til antallet af for tidlige dødsfald og naturlige kilder med omkring 26%. Landbrug i udlandet bidrager med ca. 13,6% til antallet af for tidlige dødsfald i Danmark og vejtransport ligger på omkring 9% i bidrag til helbredseffekter i Danmark. Endelig er bidraget fra boligopvarmning og fremstillingsprocesser nogenlunde lige stort og i størrelsesordenen 5-6%.

12.4 Danske og udenlandske kilder til omkostningerne fra luftforureningen i Danmark 2021

Kilderne til omkostningerne fra luftforureningen i Danmark er beregnet for 2021 ved hjælp af EVA7.1. Der er også her anvendt samme modelopsætning og økonomisk værdisætning, som i forbindelse med NOVANA-rapporteringen for 2020 (Ellermann et al., 2022; Andersen et al., 2019). Beregningerne med EVA7.1 modelsystemet er gennemført, så det er muligt at adskille omkostninger fra danske hhv. europæiske kilder.

Tabel 12.7 viser de samlede omkostninger fordelt på de forskellige luftforureningskomponenter, som giver anledning til helbredseffekter i Danmark i 2021. Det ses, at de samlede omkostninger, som følge af luftforureningen i Danmark fra såvel udenlandske som danske kilder, er på omkring 63 milliarder kr. i 2021, hvilket er lidt over gennemsnittet for perioden 2019-2021. For tidlige dødsfald som følge af korttids- og langtidseksponering tegner sig for den største del af omkostningen, omkring 58 milliarder kr. Sygedage (dage med restriktioner i aktivitet) tegner sig for ca. 2,6 milliarder kr. og kronisk bronkitis (børn) for ca. 873 mio. kr. Den samlede helbredsrelaterede omkostning var omkring 139 milliarder kr. som middel over årene 1988-1990, og den er dermed faldet med omkring 55%.

Tabel 12.7. De samlede omkostninger i 2021 fra luftforureningen med svovldioxid (SO₂), ozon (O₃), kvælstofdioxid (NO₂), PPM_{2,5} (direkte udledte partikler), øvrig PM_{2,5}, PM_{2,5} (sum af primær og øvrig PM_{2,5}) og total i Danmark dvs. al luftforurening både fra danske og udenlandske kilder (mio. kr., 2016 priser).

Helbredseffekt	Omkostninger						Total
	SO ₂	O ₃	NO ₂	PPM _{2,5}	Øvrig PM _{2,5}	PM _{2,5}	
For tidlig død (korttidseksposering)	883	2.730	847	1.940	7.590	9.530	13.400
For tidlig død (langtidseksposering)			367	8.880	35.000	43.900	44.200
For tidlig død (total)	883	2.730	1.210	10.800	42.600	53.400	58.200
Hospitalsindlæggelser, åndedrætsbesvær		10	110	22	85	106	227
Hospitalsindlæggelser, hjertekarsygdomme		51		24	95	120	170
Hoste børn				1	3	3	3
Kronisk bronkitis børn				177	696	873	873
Tabte arbejdsdage				77	304	382	382
Dage med restriktioner i aktivitet				522	2.040	2.560	2.560
Dage med mindre restriktioner i aktivitet		222					222
Lungekræft				52	204	255	255
Spædbarnsdød				1	3	4	4
Total	883	2.950	1.330	11.700	46.000	57.700	63.200

Bidrag fra danske og udenlandske kilder til luftforureningens omkostninger i Danmark

Tabel 12.8 viser fordelingen af bidraget til luftforureningens omkostninger i Danmark (i mio. kr.) opgjort fra kilder i udlandet og Danmark, mens tabel 12.9 giver bidragene i %. Det samlede bidrag til omkostninger i Danmark fra danske kilder er ca. 17 mia. kr. Heraf bidrager Ikke-industriel forbrænding med ca. 5,8 mia. kr., Vejtransport med ca. 3,9 mia. kr. og Landbrug med ca. 3,5 mia. kr. For Landbrug, er det bidraget til dannelsen af sekundære uorganiske partikler (ammoniumholdige partikler), der har størst betydning, mens det for Ikke-industriel forbrænding er udledningen af primære partikler. De samlede bidrag fra kvælstofdioxid pga. udledning fra danske kilder er på ca. 4,6 mia. kr. og primært udledte partikler og øvrige partikler fra danske kilder bidrager ca. lige meget (6,6-6,2 mia. kr.), mens danske kilder bidrager til færre helbredsrelaterede omkostninger fra ozon, pga. udledninger af kvælstofoxider. De helbredsrelaterede omkostninger fra udledninger af svovldioxid fra danske kilder er beregnet til knapt 1 mia. kr.

Det er specielt fremstillingsvirksomhed, energiproduktion, industrielle processer og affaldshåndtering, der bidrager til luftforureningens omkostninger i Danmark fra danske kilder for svovldioxid. For ozon, er det specielt vejtransport, ikke-vejgående transport og energisektoren, der bidrager, men negativt, sådan at kilderne (ved udledning af kvælstofoxider) bidrager til at mindske ozon koncentrationerne. De samme sektorer er væsentlige bidragsydere til kvælstofdioxid, der også har Ikke-industriel forbrænding som væsentligt bidrag. Udslip af kvælstofoxider bidrager til omkostningerne, mens der er en gevinst fra ozon. Gevinsten fra reduceret ozon (samlet -214 mio. kr. fra alle danske kilder) opvejer dog langt fra omkostningerne fra kvælstofdioxid (samlet ca. 1 mia. kr. fra alle danske kilder).

Tabel 12.8. De samlede omkostninger i 2021 som følge af luftforureningen i Danmark fra danske og udenlandske kilder, fordelt på sektorer og udvalgte undersektorer i mio. kr (2016 priser). Yderst til højre vises de totale omkostninger, de øvrige søjler er omkostningerne fordelt på svovldioxid (SO₂), ozon (O₃) og kvælstofdioxid (NO₂), PPM_{2,5} (direkte udledte partikler) og øvrig PM_{2,5}, PM_{2,5} (sum af primær og øvrig PM_{2,5}), samt total. Summen af alle kilder er givet sammen med omkostningerne fra den totale luftforurening. Differencen i % skyldes ikke-lineære atmosfærekemiske processer.

SNAP	Emissionssektor	SO ₂	O ₃	NO ₂	PPM _{2,5}	Øvrig PM _{2,5}	PM _{2,5}	Total
Danske kilder								
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	217	-23	732	180	247	427	1.350
201	Ikke-industriel forbrænding	7	0	63	59	35	94	164
	<i>Handel og service</i>							
202	Ikke-industriel forbrænding	60	-10	231	3.500	1.340	4.830	5.120
	<i>Husholdninger</i>							
203	Ikke-industriel forbrænding	16	2	20	325	138	463	501
	<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>							
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	317	-7	255	104	171	275	840
4	Industrielle processer	149	10	2	245	190	435	596
5	Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	10	4	0	6	69	76	90
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	4	15	3	213	84	298	319
701-706	Vejtransport <i>Udstødning</i>	9	-152	2.150	245	709	954	2.960
707-708	Vejtransport <i>Ikke-udstødning</i>	0	3	0	688	261	948	952
8	Andre mobile kilder	18	-48	697	330	318	648	1.320
9	Affald	147	5	15	161	139	300	466
10	Landbrug	0	-13	465	536	2.530	3.060	3.520
Europæiske og udenlandske kilder								
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	49	56	21	115	2.560	2.680	2.800
2	Ikke-industriel forbrænding	24	89	16	1.480	2.150	3.630	3.760
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	72	140	27	1	3.780	3.780	4.020
4	Industrielle processer	-1	94	-2	590	281	871	962
5	Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	4	72	-1	32	219	251	327
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	0	203	-3	84	111	195	394
7	Vejtransport	4	439	81	455	5.480	5.930	6.460
8	Andre mobile kilder	1	111	24	209	1.300	1.510	1.650
9	Affald	0	19	0	165	207	372	391
10	Landbrug	-7	317	28	221	8.490	8.700	9.040
-	International skibstransport	86	104	1870	746	7.340	8.080	10.100
-	Naturlige kilder	-4	2.940	54	654	10.800	11.400	14.400
Sum alle kilder		1.180	4.380	6.750	1.1300	49.000	60.300	72.600
Total luftforurening		883	2.950	1.330	11.700	46.000	57.700	63.200
Difference i % mellem sum af sektorer og total luftforurening		34	48	409	-3	6	5	15

Europæiske landbaserede kilder bidrager til luftforureningens omkostninger med sammenlagt ca. 1,5 mia. kr. mht. ozon, mens naturlige kilder fra hele den nordlige hemisfære dominerer med et bidrag på ca. 2,9 mia. kr. Hertil skal nævnes, at ozon kan have en relativt lang levetid i atmosfæren (op til to uger), og ozon skal således ses i en global sammenhæng, hvor kilder i f.eks. Sydøstasien kan være en væsentlig bidragsyder (bidrag fra den sydlige hemisfære er

ikke medtaget her, men vurderes at være minimale). Desuden er der et væsentligt bidrag af ozon fra stratosfæren, som er beskrevet i modellen, men ikke kvantificeret her.

For kvælstofdioxid er bidraget fra udenlandske kilder omkring 2,1 mia. kr., hvor den største enkelte bidragsyder er international skibstrafik med ca. 1,9 mia. kr. Bidraget fra de primært udledte partikler fra udlandet er samlet omkring 4,7 mia. kr., hvor de største kilder er Ikke-industriel forbrænding med omkring 1,5 mia. kr., International skibstrafik med ca. 746 mio. kr. og Industrielle processer med omkring 590 mio. kr.

Det største bidrag fra udenlandske kilder kommer fra øvrige PM_{2,5}, som indbefatter de sekundært dannede partikler og havsalt, som udgør en stor andel af de naturlige kilder. Landbrug i Europa bidrager med ca. 8,5 mia. kr. til luftforureningens omkostninger i Danmark og international skibstrafik med omkring 7,3 mia. kr. Det er emissioner af svovldioxid, kvælstofoxider og ammoniak, der bidrager til de sekundært dannede uorganiske partikler, som typisk er langtransporteret i atmosfæren.

Sammenlagt udgør bidraget fra de europæiske landbaserede kilder til de totale omkostninger i Danmark ca. 29,8 mia. kr., med størst bidrag fra Landbrug (ca. 9 mia. kr.), Vejtransport (med ca. 6,5 mia. kr.) og Fremstillingsvirksomhed og byggeri (ca. 4 mia. kr.) og Ikke-industriel forbrænding med ca. 3,8 mia. kr. Derudover bidrager International skibstrafik med omkring 10,1 mia. kr. og de naturlige kilder med ca. 14,4 mia. kr.

Summen af luftforureningens omkostninger for de forskellige stoffer, der bidrager til helbredseffekter, både danske og udenlandske, er angivet i tabel 12.8, ligesom de totale omkostninger, som skyldes den totale luftforurening fra alle kilder samlet. De to tal giver ikke nødvendigvis det samme pga. ikke-lineære atmosfærekemiske processer, samt tærskelværdier hvorunder der ikke regnes effekter, som har særlig betydning for NO₂ og O₃. En forskel fra -3% - 409% ses, afhængigt af kemisk stof. Forskellen på -3% for de primære partikler (PPM_{2,5}), skyldes det såkaldte Gibb's fænomen (numeriske oscillationer i Eulerske modeller pga. stærke gradienter).

Tabel 12.9 viser fordelingen af bidraget til de totale omkostninger i Danmark fra udenlandske og danske kilder opgjort på sektorer i %. For svovldioxid er det specielt Fremstillingsvirksomhed og byggeri der bidrager med ca. 27%, Energiindustri, der bidrager med omkring 18%, samt Industrielle processer og affaldshåndtering i Danmark, der bidrager med omkring 12-13% hver. Svovldioxid i sig selv er dog den mindste bidragsyder til de samlede omkostninger, da udledninger af svovldioxid er reduceret betragteligt i de seneste årtier. Vejtransport og Ikke-vejgående transport, samt Energiindustrien er de væsentligste bidragsydere til omkostningerne forbundet med ozon og kvælstofdioxid. For de primært emitterede partikler (PPM_{2,5}) er det hovedsageligt Ikke-industriel forbrænding i husholdninger (boligopvarmning), samt Vejtransport, der bidrager med hhv. 31% og 8%. For Vejtransporten er bidraget fra udledningerne, der ikke er relateret direkte til udstødning (dæk-, bremse- og vejslid) omtrent tre gange så stort, som bidraget fra udstødning. Indenfor øvrig PM_{2,5} bidrager Landbrug med omkring 5%, Ikke-industriel forbrænding med ca. 3% og Vejtransport med ca. 2%. Lægges bidraget fra de forskellige kemiske stoffer sammen (i total), ses det, at Ikke-industriel forbrænding i Danmark bidrager samlet med omkring 7%, mens Vejtransport og Landbrug begge bidrager med ca. 5% ud af de totale omkostninger.

Tabel 12.9. De samlede omkostninger i 2021 som følge af luftforureningen i Danmark fra danske og udenlandske kilder, fordelt på sektorer og udvalgte undersektorer i %. Yderst til højre angives de totale omkostninger i % for alle stoffer. De øvrige søjler angiver omkostningerne i % fordelt på svovldioxid (SO₂), ozon (O₃) og kvælstofdioxid (NO₂), PPM_{2,5} (direkte udledte partikler) og øvrig PM_{2,5}, PM_{2,5} (sum af primær og øvrig PM_{2,5}).

SNAP	Emissionssektor	SO ₂	O ₃	NO ₂	PPM _{2,5}	Øvrig PM _{2,5}	PM _{2,5}	Total
Danske kilder								
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	18,3	-0,5	10,8	1,6	0,5	0,7	1,9
201	Ikke-industriel forbrænding	0,6	0,0	0,9	0,5	0,1	0,2	0,2
	<i>Handel og service</i>							
202	Ikke-industriel forbrænding	5,1	-0,2	3,5	30,8	2,7	8,0	7,0
	<i>Husholdninger</i>							
203	Ikke-industriel forbrænding	1,4	0,0	0,3	2,9	0,3	0,8	0,7
	<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>							
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	26,8	-0,2	3,8	0,9	0,3	0,5	1,2
4	Industrielle processer	12,6	0,2	0,0	2,2	0,4	0,7	0,8
5	Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	0,9	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	0,4	0,3	0,0	1,9	0,2	0,5	0,4
701-706	Vejtransport <i>Udstødning</i>	0,8	-3,5	31,8	2,2	1,4	1,6	4,1
707-708	Vejtransport <i>Ikke-udstødning</i>	0,0	0,1	0,0	6,1	0,5	1,6	1,3
8	Andre mobile kilder	1,5	-1,1	10,3	2,9	0,6	1,1	1,8
9	Affald	12,4	0,1	0,2	1,4	0,3	0,5	0,6
10	Landbrug	0,0	-0,3	6,9	4,7	5,2	5,1	4,8
Europæiske og udenlandske kilder								
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	4,1	1,3	0,3	1,0	5,2	4,4	3,9
2	Ikke-industriel forbrænding	2,0	2,0	0,2	13,0	4,4	6,0	5,2
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	6,0	3,2	0,4	0,0	7,7	6,3	5,5
4	Industrielle processer	-0,1	2,1	0,0	5,2	0,6	1,4	1,3
5	Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	0,4	1,7	0,0	0,3	0,4	0,4	0,4
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	0,0	4,6	0,0	0,7	0,2	0,3	0,5
7	Vejtransport	0,4	10,0	1,2	4,0	11,2	9,8	8,9
8	Andre mobile kilder	0,1	2,5	0,4	1,8	2,7	2,5	2,3
9	Affald	0,0	0,4	0,0	1,5	0,4	0,6	0,5
10	Landbrug	-0,6	7,2	0,4	1,9	17,3	14,4	12,5
-	International skibstransport	7,2	2,4	27,7	6,6	15,0	13,4	14,0
-	Naturlige kilder	-0,3	67,2	0,8	5,8	22,0	18,9	19,8
Sum alle kilder		100	100	100	100	100	100	100

Ser man på bidraget fra udlandet mht. de primært emitterede partikler, bidrager Ikke-industriel forbrænding med ca. 13%, International skibstrafik med ca. 7%, Industrielle processer med ca. 5% og Vejtransport med ca. 4%. For øvrig PM_{2,5} er det naturlige kilder (herunder havsalt, skovbrande, sekundære uorganiske partikler fra naturlige kilder af kvælstofoxider og sekundære organiske partikler, der dannes fra udledninger af flygtige organiske forbindelser fra vegetation), der er dominerende med ca. 22%. Dernæst kommer Landbrug med ca. 17% (som skyldes ammoniakudledninger), International skibstransport med ca. 15% og Vejtransport med ca. 11%. Forbrænding af fossile brændstoffer i Energisektoren og Fremstillingssektoren, samt Ikke-industriel forbrænding, bidrager mellem ca. 4%-8% for hver sektor. Overordnet set, når

man kigger på totalen (bidraget fra stofferne lagt sammen) bidrager de naturlige kilder med ca. 20%, Landbrug og International skibstransport med hhv. ca. 13% og 14% og Vejtransport med ca. 9%.

Der ses negative værdier for ozon i Danmark, hvilket skyldes et velkendt fænomen, hvor de danske udledninger af kvælstofoxider bidrager til at mindske ozonkoncentrationerne lokalt i Danmark pga. ikke-lineær atmosfærekemi. Desuden ses der mindre negative værdier for svovldioxid for udenlandske kilder (sektor 4 og 10). Dette skyldes også ikke-lineær atmosfærekemi.

12.5 Usikkerhed og perspektiver for de fremtidige beregninger

Usikkerhederne på beregnede helbredseffekter og omkostninger fra luftforurening er betydelige. Førende internationale forskere på området har vurderet, at deres egne beregninger er behæftet med en usikkerhed på op til $\pm 50\%$ (Lelieveld et al., 2019). DCE vurderer, at usikkerhederne på beregningerne præsenteret i nærværende rapport ligger på samme niveau.

En væsentlig del af usikkerhederne relaterer sig til de eksponerings-responsfunktioner, som anvendes. Dette års opdatering af eksponerings-responsfunktionerne baseret på WHO's nye retningslinjer giver ændringer for blandt andet for tidlige dødsfald som følge af eksponering for kvælstofdioxid, hvor den tidligere tærskelværdi for NO_2 på $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (kun gældende for langtidseksponering) nu er ændret til $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, men til gengæld gælder både for korttids- og langtidseksponering (se beskrivelsen i afsnit 1.5). I praksis betyder det, at antallet af for tidlige dødsfald som følge af langtidseksponering for NO_2 vurderes at stige, men til gengæld vurderes antallet af for tidlige dødsfald at falde som følge af korttidseksponering for NO_2 .

Helbredseffekter fra ozon kommer primært fra eksponering for høje koncentrationer, så derfor benyttes i dag en parameter (SOMO35), hvor det er ozonkoncentrationer over 35 ppb ($=70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) som summeres. De nye analyser fra WHO (WHO, 2021a) indikerer, at det kunne være mere korrekt at summere ozonkoncentrationer over 32 ppb ($=64 \mu\text{g}/\text{m}^3$; SOMO30), men da evidensen vurderes til at være moderat, er SOMO35 bevaret som tærskelværdi for ozon.

Helt nye danske studier (Hvidtfeldt et al., 2019; Raaschou-Nielsen et al., 2020; So et al., 2020) tyder på, at den relative risiko for dødelighed som følge af langtidseksponering for $\text{PM}_{2.5}$ kan være højere end de 1,08 som WHO's meta-studie kommer frem til. WHO's analyser (WHO, 2021a) peger endvidere på, at der kan være en tærskel for $\text{PM}_{2.5}$ -koncentrationens effekt på dødelighed. For at undersøge hvad denne variation i parametre betyder for antallet af for tidlige dødsfald, er der gennemført sensitivitetsberegninger. Disse beregninger ser kun på antallet af for tidlige dødsfald, såvel som følge af korttids- som langtidseksponering.

Tabel 12.10. Antallet af for tidlige dødsfald i Danmark for 2021 (som følge af både korttids og langtidseksponering) for sensitivitetsberegninger foretaget med ændringer i relativ risiko og tærskelværdi for $\text{PM}_{2.5}$.

Scenario	$\text{PM}_{2.5}$ relativ risiko	$\text{PM}_{2.5}$ tærskelværdi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Antal for tidlige dødsfald
Basis	1,08	0	3900
DK-A	1,08	2,4	2600
DK-B	1,12	0	5800
DK-C	1,12	2,4	3800

Tabel 12.10 viser resultaterne af beregninger af antallet af for tidlige dødsfald i Danmark for tre sensitivitetsscenarioer samt basisscenariet, der svarer til dette års beregninger for 2021. Den relative risiko på 1,12 er baseret på de ovenfor nævnte nye danske studier, der også argumenterer for, at der ikke skal være en tærskelværdi for eksponeringen for $PM_{2,5}$, dvs. scenario DK-B, som giver ca. 2000 flere for tidlige dødsfald sammenlignet med basisscenariet. Der er endvidere usikkerhed omkring tærskelværdien, der anvendes for NO_2 , da der stadigvæk ikke er mange studier på dette.

Der mangler fortsat viden om, hvilke dele af partikelforureningen, som giver årsag til helbredseffekterne. Der anvendes den samme eksponerings-respons-funktion for alle de kemiske $PM_{2,5}$ -komponenter, da det på nuværende tidspunkt stadig er bedste viden på trods af en række forsøg på analyser af de enkelte komponenters betydning (Raaschou-Nielsen et al., 2023). Mere viden på dette område vil potentielt set ændre på de estimerede helbredseffekter relateret til de forskellige kemiske stoffer og udledningssektorer, mens det ikke nødvendigvis vil påvirke det totale antal tilfælde.

Der er usikkerhed forbundet med opgørelsen af hvilke kilder, der bidrager til helbredseffekterne, da denne afhænger af, hvilken procentsats udledningerne bliver reduceret med. Dette skyldes ikke-lineær atmosfærisk kemi, som er godt beskrevet i luftforureningsmodellerne. Denne ikke-linearitet betyder, at bestemmelsen af en udledningssektors bidrag til Danmark afhænger af, hvor meget man reducerer sektoren med i de beregninger, der ligger til grund for bestemmelsen. I denne rapport er benyttet 30% udledningsreduktioner for hver sektor, som efterfølgende er skaleret op til 100%. Ikke-lineariteten har særlig betydning for de udenlandske kilder, hvis størrelser er betragtelige (f.eks. SNAP 7, som indbefatter al vejtransport i Europa). Når man i modellen reducerer udledninger fra denne sektor for hele Europa, vil det medføre en ændret "baggrundskemi" over Europa, som så igen påvirker størrelsen af bidraget fra sektoren. Der er ikke tale om en betydelig usikkerhed, eller manglende viden på området, men i stedet om en velforstået ikke-lineær sammenhæng mellem størrelsen på udledningsreduktionen og bidraget fra de respektive udledningssektorer. Dette gælder i mindre grad for danske kilder, da udledningerne er relativt mindre, på nær for NO_2 , hvor den nye tærskelværdi for korttidseksponering bidrager væsentligt til, at de ikke-lineære processer i atmosfæren får indvirkning på resultaterne. De primære partikler ($PPM_{2,5}$ og havsalt) er lineære, da de ikke indgår i atmosfærisk-kemiske reaktioner.

Fremadrettet vil DCE fortsat løbende følge med i de videnskabelige landvinde 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 tæt dialog med de øvrige centrale forskningsinstitutioner på området. Opdateringerne vil ske med passende mellemrum, når der er sket væsentlige fremskridt i forskningen omkring helbredsrelaterede effekter af luftforureningen.

13. Luftkvalitet og WHO's nye anbefalinger

I september 2021 offentliggjorde WHO nye retningslinjer for udsættelse for helbredsskadelig luftforurening (WHO, 2021a). Siden offentliggørelsen af de hidtidige retningslinjer fra 2006 er der på globalt plan udført omfattende forskning på området, og derfor er der i dag etableret en meget større viden om de helbredsskadelige effekter af luftforureningen. Det er denne viden, som danner grundlag for WHO's opdatering af retningslinjerne fra 2006.

Retningslinjerne omfatter alle de vigtigste helbredsskadelige luftforureningskomponenter, dvs. kvælstofdioxid, carbonmonoxid, svovldioxid, ozon og partikler (PM_{2,5} og PM₁₀), og for disse er der opstillet retningslinjer for både korttids- og langtidsudsættelse. WHO har også vurderet, om der skulle opstilles retningslinjer for ultrafine partikler og black carbon, men det blev vurderet, at det videnskabelige grundlag ikke var tilstrækkeligt til på nuværende tidspunkt af fastlægge retningslinjer for disse komponenter.

Opdateringen har for hovedparten af luftforureningskomponenterne ført til en væsentlig reduktion af retningslinjerne. Eneste undtagelse er svovldioxid, hvor WHO fandt, at de videnskabelige resultater viste, at retningslinjerne kunne hæves.

I det følgende gives en kort gennemgang af, hvordan luftforureningsniveauet i 2021 i Danmark ligger i forhold til de nye retningslinjer fra WHO for kvælstofdioxid, carbonmonoxid, svovldioxid, ozon og partikler (PM_{2,5} og PM₁₀).

13.1 Kvælstofdioxid

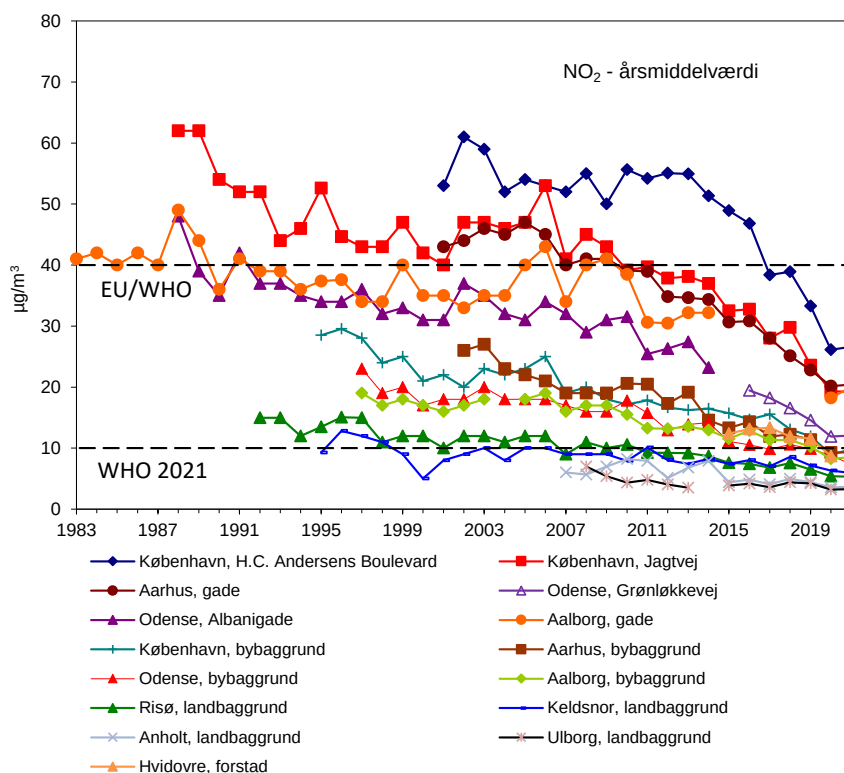
Tabel 13.1 viser, at luftkoncentrationerne af kvælstofdioxid lå under WHO's retningslinjer fra 2006. Den nye retningslinje for årsmiddelkoncentrationer er blevet reduceret til 10 µg/m³ svarende til 25% af den gamle retningslinje fra WHO og EU's grænseværdi. Ved alle gademålestationer ligger årsmiddelkoncentrationerne i gennemsnit omkring dobbelt så højt som den nye retningslinje. Til gengæld ligger årsmiddelkoncentrationerne under den nye retningslinje ved alle by- og landbaggrundsmålestationer. I Figur 13.1 sammenholdes udviklingstendensen for årsmiddelkoncentrationerne med EU-grænseværdien og den gamle og nye retningslinje fra WHO.

Retningslinjen for den maksimale timemiddelkoncentration forblev uændret, og her ligger koncentrationerne under på alle målestationer. WHO har indført en ny korttidsgrænse for 99%-fraktilen af døgnmiddelværdi i et kalenderår (svarer omtrent til den 4. højeste døgnmiddelværdi). For denne retningslinje måles ingen overskridelse i by- og landbaggrund, mens der er overskridelse på 2-20% for tre af gademålestationer. Kun ved gademålestationen på Jagtvej i København og i Odense overholdes den nye retningslinje.

Tabel 13.1. Sammenligning mellem måleresultater for kvælstofdioxid fra de danske målestationer og WHO's retningslinjer fra 2021 (WHO, 2021a).

	Årsmiddel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Maksimal timemiddelværdi $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Døgnmiddel 99%-fraktil $\mu\text{g}/\text{m}^3$
WHO 2006	40	200	
WHO 2021	10	200	45
<i>Gade</i>			
København, H.C. Andersens Boulevard	27	114	53
København, Jagtvej	19	136	41
Odense, Grønløkkevej	12	72	33
Aarhus, Banegaardsgade	20	137	51
Aalborg, Vesterbro	20	112	46
<i>Bybaggrund</i>			
København	10	56	26
Odense	7,4	79	23
Aarhus	9,3	66	30
Aalborg	8,5	73	26
<i>Forstad</i>			
Hvidovre	11*	63*	29*
<i>Landbaggrund</i>			
Anholt	3,7	62	16
Keldsnor	6,0	76	24
Risø	5,3	47	19
Ulborg	3,3	26	14

*Målestationen i Hvidovre blev flyttet i 2021, og der er derfor kun resultater fra omkring 6,5 måneder. De viste data ligger højere end den reelle årsmiddel, da der primært mangler data fra sommerperioden.



Figur 13.1. Udviklingstendens for årsmiddelværdi af kvælstofdioxid sammenlignet med EU's grænseværdi (EU, 2008) og WHO's retningslinjer fra 2006 og 2021 (WHO, 2021a). EU's grænseværdi og WHO's retningslinje fra 2006 ligger begge på 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, så derfor angives dette ved EU/WHO.

13.2 Carbonmonoxid

For carbonmonoxid er der kun fastlagt retningslinjer for korttidseksponeringen for carbonmonoxid. WHO har opretholdt de to retningslinjer fra 2006 og har indført en ny vedrørende 99%-fraktilen for døgnmiddelkoncentrationerne af carbonmonoxid. Tabel 13.2 sammenholder måleresultaterne fra de danske målestationer med de tre retningslinjer for korttidseksponering, og det fremgår tydeligt, at koncentrationsniveauerne i Danmark ligger langt under de fastlagte retningslinjer.

Der er endvidere en fjerde retningslinje i form af en 15-minutters-middelværdi af carbonmonoxid (100.000 µg/m³; WHO, 2021a). Da målingerne er baseret på ½-timesmiddelværdier, kan der ikke laves en direkte vurdering. Grundet det lave koncentrationsniveau i Danmark, kan det imidlertid udelukkes, at denne retningslinje vil kunne blive overskredet i Danmark.

Tabel 13.2. Sammenligning mellem måleresultater for carbonmonoxid fra de danske målestationer og WHO's retningslinjer fra 2021 (WHO, 2021a).

	Maksimal timemiddelværdi µg/m ³	Maksimal 8-timers middelværdi µg/m ³	Døgnmiddel 99%-fraktil µg/m ³
WHO 2006	35000	10000	
WHO 2021	35000	10000	4000
<i>Gade</i>			
København, H.C.Andersens Boulevard	1896	852	438
Odense, Grønløkkevej	976	659	404
Aarhus, Banegaardsgade	979	686	377
Aalborg, Vesterbro	1224	659	461
<i>Bybaggrund</i>			
København	515	481	345
<i>Landbaggrund</i>			
Risø	516	444	340

13.3 Svovldioxid

For svovldioxid er der ligeledes kun fastlagt retningslinjer for korttidseksponeringen. Ved opdateringen i 2021 blev retningslinjen for 99%-fraktilen af døgnmiddelkoncentrationerne af svovldioxid øget fra 20 til 40 µg/m³ (WHO, 2021a). Niveauerne ved målestationerne (Tabel 13.3) lå kun på omkring 25% af den gamle grænse, så derfor er der slet ingen problemer med overholdelse af den nye retningslinje.

WHO har endvidere opretholdt en retningslinje for 10-minutters-middelværdi af svovldioxid (500 µg/m³; WHO, 2021a). Da målingerne er baseret på ½-timesmiddelværdier kan der ikke laves en direkte vurdering, men grundet de lave timemiddelværdier i Danmark kan det udelukkes, at denne grænse vil kunne blive overskredet ved målestationerne i Danmark

Tabel 13.3. Sammenligning mellem måleresultater for svovldioxid fra de danske målestationer og WHO's retningslinjer fra 2021 (WHO, 2021a).

	Døgnmiddel 99%-fraktil $\mu\text{g}/\text{m}^3$
WHO 2006	20
WHO 2021	40
<i>Gade</i>	
København, H.C.Andersens Boulevard	1,5
Aalborg, Vesterbro	3,2

13.4 Ozon

WHO har indført en ny retningslinje for langtidsksponeering for ozon kaldet "ozon peak season". Denne retningslinje baseres på et gennemsnit af de maksimale daglige 8-timersmiddelværdier beregnet for de seks på hinanden følgende måneder i et kalenderår, hvor der måles de højeste værdier (WHO, 2021a). Ud fra målingerne på målestationerne er det fastlagt, at gennemsnittet i Danmark skal beregnes fra marts til og med august. Tabel 13.4 viser resultaterne for ozon peak season for de danske målestationer. For by- og landbaggrund ligger ozon peak season fra 25% til 42% over den anbefalede grænse, mens niveauet ligger noget lavere ved gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard. Her ligger niveauet omkring 13% over retningslinjen. Det lavere niveau ved gademålestationen skyldes den lokale nedbrydning af ozon grundet udledning af kvælstofoxider fra vejtrafikken.

WHO her endvidere opretholdt den gamle retningslinje for korttidsksponeering for ozon baseret på 99%-fraktilen af 8-timersmiddelmålkoncentrationerne i et kalenderår. By- og landbaggrund ligger fra 4% til 23% over denne retningslinje i 2021, mens ozonkoncentrationerne ved gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard kun ligger 1% over retningslinjen (Tabel 13.4).

Tabel 13.4. Sammenligning mellem måleresultater for ozon fra de danske målestationer og WHO's retningslinjer fra 2021 (WHO, 2021a).

	Ozon Peak season* $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Maksimal 8-timers Middelværdi 99%-fraktil $\mu\text{g}/\text{m}^3$
WHO 2006		100
WHO 2021	60	100
<i>Gade</i>		
København, H.C.Andersens Boulevard	68	101
<i>Bybaggrund</i>		
København	83	122
Odense	80	115
Aarhus	77	107
Aalborg	78	104
<i>Landbaggrund</i>		
Keldsør	79	116
Risø	85	123
Ulborg	75	107

* Ozon peak season angiver gennemsnit for den maksimale daglige løbende 8-timersmiddelværdi beregnet for de seks på hinanden følgende måneder med de højeste værdier. For Danmark er det fra marts til august.

13.5 Partikler, PM_{2,5} og PM₁₀

For de luftbårne partikler (PM_{2,5} og PM₁₀) er der kommet stærk evidens for, at der er betydelige helbredseffekter selv ved udsættelse for lave koncentrationer. På basis af dette har WHO nedsat alle retningslinjerne fra 2006 til 2021 (WHO, 2021a; Tabel 13.5) og for langtidseksponeringen for PM_{2,5} er der tale om en halvering. Årsmiddelmålkoncentrationerne for PM_{2,5} lå i 2021 under den gamle retningslinje på 10 µg/m³ ved alle målestationer i by- og landbaggrund og for hovedparten af gademålestationerne. Kun ved H.C. Andersens Boulevard var der tale om en overskridelse (3%). Koncentrationerne ved gademålestationerne ligger omtrent dobbelt så højt som den nye retningslinje og ved by- og landbaggrundsmålestationerne ligger niveauet fra 45% til 60% over retningslinjen.

For PM₁₀ ses omtrent det samme billede, hvor niveauerne var overholdt set i forhold til den gamle retningslinje, dog undtagen gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard. Set i forhold til den nye retningslinje så er der overskridelse ved alle gademålestationerne, mens by- og landbaggrund ligger lavere end selv den nye retningslinje.

Figur 13.2 viser udviklingstendenserne for årsmiddelværdierne af PM_{2,5} og PM₁₀ sammenholdt med EU-grænseværdi og den gamle og nye retningslinje fra WHO. Figurene viser, at koncentrationsniveauerne for PM₁₀ ligger tættere på den nye retningslinje end for PM_{2,5}.

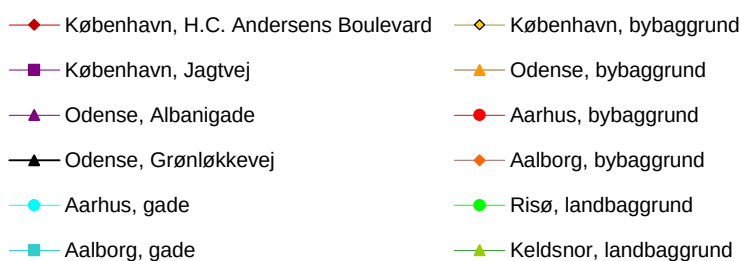
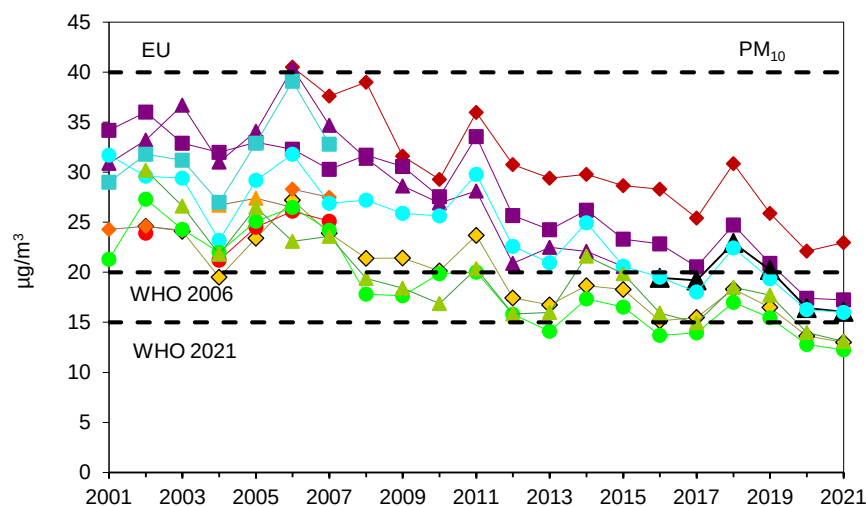
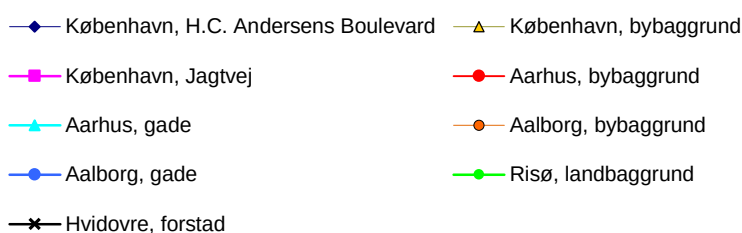
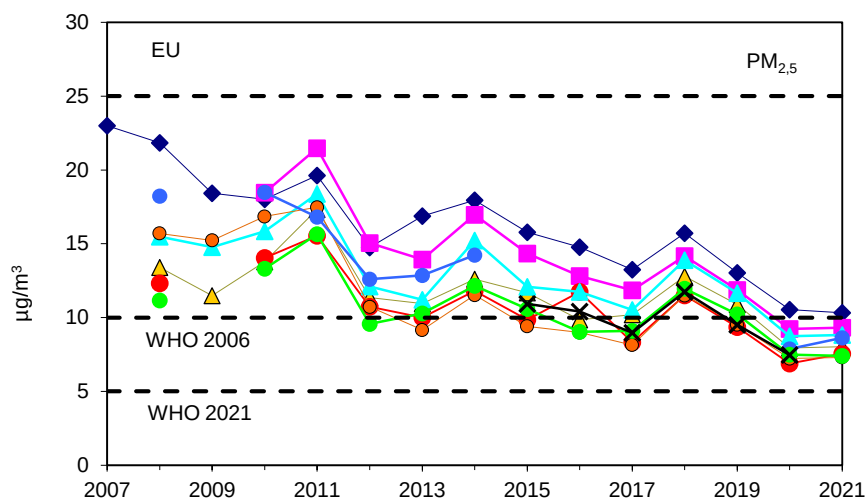
Retningslinjen for korttidseksponering for PM_{2,5} baseret på 99%-fraktilen af døgnmiddelværdierne blev overholdt ved halvdelen af målestationerne set i forhold til de gamle WHO-retningslinjer fra 2006, men set i forhold til de nye retningslinjer, så ses der relativt stor overskridelse på alle målestationer (50-100%). Koncentrationsniveauet for PM₁₀ ligger noget lavere i forhold til retningslinjerne. For PM₁₀ ligger niveauerne under den gamle retningslinje for alle målestationer, og det er kun ved gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard, at der er overskridelse for den nye retningslinje.

Tabel 13.5 illustrerer endvidere, at det er PM_{2,5}, der skal reduceres for at kunne komme til at overholde de nye retningslinjer fra WHO, og at man stort set vil komme i mål med PM₁₀, hvis blot man sørger for overholdelse af retningslinjen for PM_{2,5}. Dette hænger sammen med, at PM_{2,5} indgår som en delmængde af PM₁₀, så hvis man opnår for eksempel en 6 µg/m³ reduktion af PM_{2,5} ved H.C. Andersens Boulevard, så vil PM₁₀ ved H.C. Andersens Boulevard ligeledes blive reduceret med 6 µg/m³ til 17 g/m³ og dermed vil man næsten komme i overensstemmelse med grænsen for PM₁₀.

Tabel 13.5. Sammenligning mellem måleresultater for PM_{2,5} og PM₁₀ fra de danske målestationer og WHO's retningslinjer fra 2021 (WHO, 2021a).

	PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{2,5} Døgnmiddel 99%-fraktil µg/m ³	PM ₁₀ Døgnmiddel 99%-fraktil µg/m ³
	Årsmiddel	Årsmiddel		
WHO 2006	10	20	25	50
WHO 2021	5	15	15	45
<i>Gade</i>				
København, H.C.Andersen Boulevard	10	23	29	55
København, Jagtvej	9,3	17	30	39
Odense, Grønløkkevej		16		43
Aarhus, Banegaardsgade	8,8	16	29	45
Aalborg, Vesterbro	8,6		24	
<i>Bybaggrund</i>				
København	8,0	13	26	33
Aarhus	7,6		24	
Aalborg	7,3		22	
<i>Forstad</i>				
Hvidovre	8,5*			
<i>Landbaggrund</i>				
Keldsnor		13		37
Risø	7,4	12	25	32

* Datadækningen ved målestationen i Hvidovre er på 48% for PM_{2,5}. Den reducerede datadækning skyldes flytningen af målestationen.



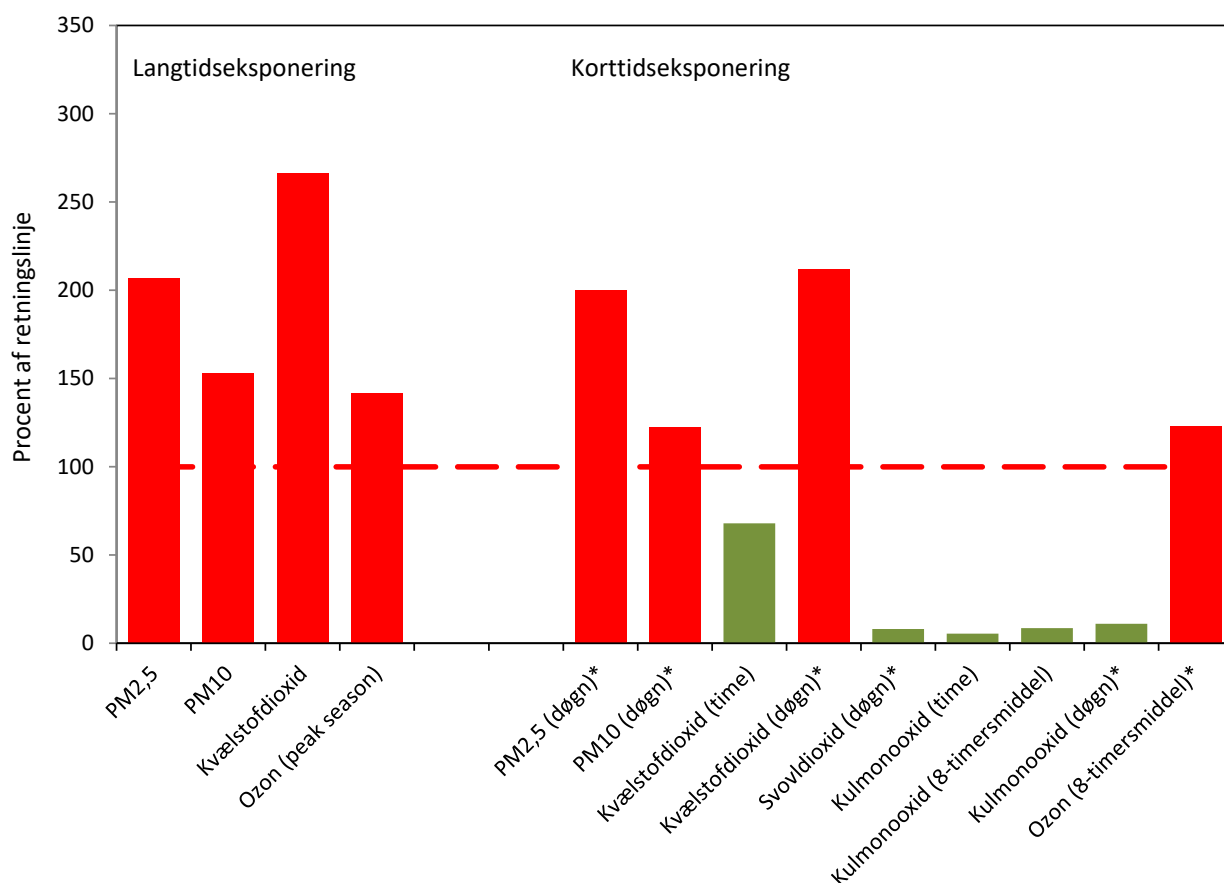
Figur 13.2. Udviklingstendens for årsmiddelværdi af $PM_{2.5}$ (øverst) og PM_{10} (nederst) sammenlignet med EU's grænseværdier (EU, 2008) og WHO's retningslinjer fra 2006 og 2021 (WHO, 2021a).

13.6 Sammenfatning

Figur 13.3 giver et samlet overblik over, hvordan koncentrationsniveauerne for kvælstofdioxid, carbonmonoxid, svovldioxid, ozon og partikler (PM_{2,5} og PM₁₀) i 2021 ligger ved de danske målestationer sammenholdt med de opdaterede retningslinjer fra WHO (2021). Koncentrationerne for langtidseksponering ligger for alle luftforureningskomponenter over de nye retningslinjer med størst overskridelse for PM_{2,5} og kvælstofdioxid.

For korttidseksponering ses ligeledes, at koncentrationerne ligger over de nye retningslinjer for PM_{2,5}, PM₁₀, kvælstofdioxid og ozon. Til gengæld ligger niveauerne for svovldioxid og carbonmonoxid klart under de nye retningslinjer.

Det er de mest helbredsskadelige luftforureningskomponenter (partikler, kvælstofdioxid og ozon), som viser størst overskridelse af retningslinjerne. Dette er med til at understrege, at der er behov for at reducere luftforureningen med disse komponenter yderligere, hvis man ønsker at opnå en reduktion af de helbredsskadelige effekter fra luftforureningen, som er beskrevet i Kapitel 12.



Figur 13.3. Oversigt over luftkvaliteten i Danmark sammenholdt med WHO's nye retningslinjer vedrørende udsættelse for helbredsskadelige luftforureningskomponenter (WHO, 2021a). Figuren er opdelt i retningslinjer vedrørende langtids- og korttidseksponering. Det er de højeste værdier målt ved de danske målestationer, som angives som procent af WHO's retningslinjer, der er indekseret til 100%. De langsigtede retningslinjer er baseret på årsmiddelkoncentrationer og for ozon på parameteren kaldet ozon peak season, som beregnes ud fra gennemsnit af den maksimale daglige løbende 8-timersmiddelværdi beregnet for de seks på hinanden følgende måneder med de højeste værdier. De kortsigtede retningslinjer er fastlagt ud fra kalenderårets højeste timemiddelværdi, 99%-fraktilen af døgnmiddel og den maksimale daglige 8-timersmiddelværdi. Hvis en parameter er mærket med stjerne angiver det, at det er 99%-fraktilen som anvendes.

14. Referencer

- Andersen, M. S., L. M. Frohn Rasmussen og J. Brandt, 2019. Miljøøkonomiske beregningspriser for emissioner 3.0. Notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi. Dato: 14. marts 2019. pp. 22. Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet. http://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2019/Miljoekonomiske_beregningspriser_for_emissioner.pdf
- Andersen, M.S., L.M. Frohn, S.S. Jensen, J.S. Nielsen, P.B. Sørensen, O. Hertel, J. Brandt, and J. Christensen, 2004. Sundhedseffekter af luftforurening – beregningspriser. Faglig rapport fra DMU, nr. 507, pp. 85. http://www2.dmu.dk/1_Viden/2_Publikationer-/3_Fagrapporter/rapporter/FR507.pdf
- Andersen, M.S., 2017: Co-benefits of climate mitigation: Counting statistical lives or life-years? I: Ecological Indicators, Bind 79, 2017, s. 11-18.
- Anenberg, S. C., A. Belova, J. Brandt, N. Fann, S. Greco, S. Guttikunda, M.-E. Heroux, F. Hurley, M. Krzyzanowski, S. Medina, B. Miller, K. Pandey, J. Roos, R. Van Dingenen, 2015. Survey of ambient air pollution health risk assessment tools. *Risk Analysis*. DOI: 10.1111/risa.12540.
- Bach, H., M. S. Andersen, J. B. Illerup, F. Møller, K. Birr-Pedersen, J. Brandt, T. Ellermann, L. M. Frohn, K. M. Hansen, F. Palmgren, J. Seested and M. Winther, 2006. Vurdering af de samfundsøkonomiske konsekvenser af Kommissionens temastrategi om luftforurening, Faglig rapport fra DMU, Nr 586, 2006.
- Barré, J., Petetin, H., Colette, A., Guevara, M., Peuch, V.H., Rouil, L., Engelen, R., Inness, A., Flemming, J., Pérez García-Pando, C., Bowdalo, D., Meleux, F., Geels, C., Christensen, J.H., Gauss, M., Benedictow, A., Tsyro, S., Frieze, E., Struzewska, J., Kaminski, J.W., Douros, J., Timmermans, R., Robertson, L., Adani, M., Jorba, O., Joly, M. & Kouznetsov, R. 2021: Estimating lockdown-induced European NO₂ changes using satellite and surface observations and air quality models, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(9), 7373-7394. <https://doi.org/10.5194/acp-21-7373-2021>
- Berkowicz, R., 2000a: OSPM - A parameterized street pollution model, *Environmental Monitoring and Assessment* 2000, 65, 323-331. doi: 10.1023/A:1006448321977.
- Berkowicz, R., 2000b: A simple model for urban background pollution. *Environ. Monit. Assess.* 65 (1/2), 259-267.
- Blomgren, H. 2021: Personlig korrespondance den 27. oktober 2021.
- Brandt, J., Christensen, J.H. Frohn, L.M. Palmgren, F. Berkowicz R. & Zlatev, Z., 2001: Operational air pollution forecasts from European to local scale. *Atmospheric Environment*, Vol. 35, Sup. No. 1, pp. S91-S98.

Brandt, J., Christensen, J.H., Frohn, L.M. & Berkowicz, R., 2003: Air pollution forecasting from regional to urban street scale – implementation and validation for two cities in Denmark. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 28, pp. 335-344.

Brandt, J., Christensen, J.H., Frohn, L.M., Berkowicz, R. & Palmgren, F. 2000: The DMU-ATMI THOR Air Pollution Forecast System. System Description, National Environmental Research Institute, Roskilde Denmark 60 pp. -NERI Technical Report No. 321. https://www2.dmu.dk/1_viden/2_Publikationer/3_fagrapporter/rapporter/fr321.pdf

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, 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. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 13, pp. 7725-7746, 2013. www.atmos-chem-phys.net/13/7725/2013/, doi:10.5194/acp-13-7725-2013.

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, 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. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Vol. 13, pp. 7747-7764, 2013. www.atmos-chem-phys.net/13/7747/2013/. doi:10.5194/acp-13-7747-2013.

Brandt, J., Jensen, S.S., Andersen, M.S., Plejdrup, M.S., Nielsen, O.K. 2016. 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., M. S. Andersen, J. Bønløkke, J. H. Christensen, K. M. Hansen, O. Hertel, U. Im, S. S. Jensen, M. Ketzel, O.-K. Nielsen, M. S. Plejdrup, T. Sigsgaard and C. Geels, 2015. High-resolution modelling of health impacts and related external cost from air pollution using the integrated model system EVA. Proceedings from ITM 2015, 34th International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application. 4-8 May, 2015, Montpellier, France. pp. 125-128.

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. & Frohn, L.M., 2011: 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, pp. 98. http://www.ceeh.dk/CEEH_Reports/Report_3/-CEEH_Scientific_Report3.pdf

Brandt, J., Silver, J.D., Frohn, L.M., Geels, C., Gross, A., Hansen, A.B., Hansen, K.M., Hedegaard, G.B., Skjøth, C.A., Villadsen, H., Zare, A. & Christensen, J.H., 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.

Burnett R, Chen H, Szyszkowicz M, Fann N, Hubbell B, Pope CA III et al. (2018). Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 115(38m):9592-7. doi: 10.1073/pnas.1803222115.

Burnett, R., Chena, H., Szyszkowicza, M., Fann, N., Hubbell, B., Pope III, C. A., Apte, J. S., Brauer, M., Cohen, A., Weichenthal, S., Coggins, J., Di Q., Brunekreef B., Frostad, J., Lim, S. S., Kan, H., Walker, K. D., Thurston, G. D., Hayes, R. B., Lim, C. C., Turner, M. C., Jerrett, M., Krewski, D., Gapstur, S. M., Diver, W. R., Ostro, B., Goldberg, D., Crouse, D. L., Martin, R. V., Peters, P., Pinault, L., Tjepkema, M., van Donkelaar, M., Villeneuve, P. J., Miller, A. B., Yin, P., Zhou, M., Wang, L., Janssen, N. A. H., Marra, M., Atkinson, R. W., Tsang, H., Thach, T. Q., Cannon, J. B., Allen, R. T., Hart, J. E., Laden, F., Cesaroni, G., Forastiere, F., Weinmayr, G., Jaensch, A., Nagel, G., Concin, H. and Spadar, J. V., Global estimates of mortality associated with longterm exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 38 (115), pp. 9592-9597. doi: 10.1073/pnas.1803222115. 2018.

Bønløkke, J. H., T. Sigsgaard, J. Brandt, L. M. Frohn, E. M. Flachs, H. Brønnum-Hansen, M.-L. Siggaard-Andersen, 2011. CEEH Scientific Report No. 7a - Description of the CEEH health effect model. Centre for Energy, Environment and Health Report Series, pp. 76, 2011. ISSN 1904-7495.

CEIP, 2023: <https://www.ceip.at/webdab-emission-database>

Chen J, Hoek G, 2020. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: a systematic review and meta-analysis. *Environ Int*. 143:105974. doi: 10.1016/j.envint.2020.105974. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974>

Chen, J. S. Rodopolou, K. de Hoogh, M. Strak, Z. J. Andersen, R. Atkinson, M. Bauwelinck, T. Bellander, J. Brandt, G. Cesaroni, H. Concin, D. Fecht, F. Forastiere, J. Gulliver, O. Hertel, B. Hoffmann, U. A. Hvidtfeldt, N. Janssen, K.-H. Jöckel, J. Jørgensen, K. Katsouyanni, M. Ketzel, J. O. Klompmaker, A. Lager, K. Leander, S. Liu, P. Ljungman, C. J. MacDonald, P. K.E. Magnusson, A. Mehta, G. Nagel, B. Oftedal, G. Pershagen, A. Peters, O. Raaschou-Nielsen, M. Renzi, D. Rizzuto, E. Samoli, Y. T. van der Schouw, S. Schramm, P. Schwarze, T. Sigsgaard, M. Sørensen, M. Stafoggia, A. Tjønneland, W. M. M. Verschuren, D. Vienneau, G. Weinmayr, K. Wolf, B. Brunekreef, G. Hoek, 2021. Long-term exposure to fine particle elemental components and natural and cause-specific mortality – a pooled analysis of eight European cohorts within the ELAPSE project. *Environmental Health Perspectives*. Volume 129, Issue 4, 1 April 2021, Page 47000. <https://doi.org/10.1289/EHP8368>

Chen, J., Hoek, G., de Hoogh, K., Rodopoulou, S., Andersen, Z.J., Bellander, T., Brandt, J., Fecht, D., Forastiere, F., Gulliver, J., Hertel, O., Hoffmann, B., Hvidtfeldt, U.A., Verschuren, W.M.M., Jöckel, K.-H., Jørgensen, J.T., Katsouyanni, K., Ketzel, M., Brynedal, B., Leander, K., Liu, S., Ljungman, P., Faure, E., Magnusson, P.K.E., Nagel, G., Pershagen, G., Peters, A., Raaschou-Nielsen, O., Rizzuto, D., Samoli, E., van der Schouw, Y.T., Schramm, S., Severi, G., Stafoggia, M., Strak, M., Sørensen, M., Tjønneland, A., Weinmayr, G., Wolf, K., Zitt, E., Brunekreef, B., Thurston, G.D., 2022. Long-term exposure to source-specific fine particles and mortality – a pooled analysis of 14 European cohorts within the ELAPSE project. *Environmental Science & Technology*. 2022, 56, 13, 9277-9290. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c01912>

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

DCE (2021): <http://envs.au.dk/videnudveksling/luft/emissioner/air-pollutants/>

DØRS, (2016): Økonomi og miljø 2016. København.

EEA, 2019: EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. Technical guidance to prepare national emission inventories. EEA Report No 13/2019. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>.

Ellermann, T., Nordstrøm, C., Brandt, J., Christensen, J., Ketzel, M., Massling, A., Bossi, R., Frohn, L.M., Geels, C., Jensen, S.S., Nielsen, O-K., Winther, M., Bech Poulsen, M., Monies, C. og Sørensen, M.B. 2022: Luftkvalitet 2020. Status for den nationale luftkvalitetsovervågning. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 144 s. - Videnskabelig rapport nr. 467.

Ellermann, T., Bossi, R., Nygaard, J., Christensen, J., Løfstrøm, P., Monies, C., Geels, C., Nilesen, I. E., & Poulsen, M. B., 2020. Atmosfærisk deposition 2021. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. 78s. – Videnskabelig rapport nr. 525. Under udarbejdelse.

Ellermann, T., Nordstrøm, C., Nygaard, J. og Massling, A., 2020: [Status for måling af luftkvalitet i 2019](#). Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 14 s. - Notat nr. 2020 | 41.

Ellermann, T., Nygaard, J., Nøjgaard, J.K., Nordstrøm, C., Brandt, J., Christensen, J., Ketzel, M., Massling, A., Bossi, R. & Jensen, S.S. 2017: The Danish Air Quality Monitoring Programme. Annual Summary for 2016. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 78 pp. Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy No. 234.

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>

Ellermann, T., Nøjgaard, J.K. & Bossi, R. 2011: Supplerende målinger til luftovervågning under NOVANA – benzen og PAH. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. 42 s. – Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 3

EU, 2004: Directive 2004/107/EC of the European Parliament and of the Council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. Official Journal of the European Union L23/3.

EU, 2008: Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 15 December 2004 on ambient air quality and cleaner air for Europe: Official Journal of the European Union L152/1.

EU, 2016: Europa-Parlamentets og Rådets Direktiv (EU) 2016/2284 af 14. december 2016 om nedbringelse af nationale emissioner af visse luftforurenende stoffer, om ændring af direktiv 2003/35/EF og om ophævelse af direktiv 2001/81/EF. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DA/TXT/HTML/?uri=CELEX:32016L2284&from=EN>

Finansministeriet (2017): Vejledning i samfundsøkonomiske konsekvensvurderinger. August 2017.

Frohn, L.M., Ketzel, M., Christensen, J.H., Brandt, J., Im, U., Massling, A., Andersen, C., Plejdrup, M.S., Nielsen, O.-K., Manders, A. and Raaschou-Nielsen, O., 2021. "Modelling ultrafine particle number concentrations at address resolution in Denmark from 1979 to 2018 – Part 1: regional and urban scale modelling and evaluation". *Atmospheric Environment*, vol. 264, 118631. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118631>.

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>.

Hoek, G., Krishnan, R.M., Beelen, R. et al. Long-term air pollution exposure and cardio- respiratory mortality: a review. *Environ Health* 12, 43 (2013). <https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-43>.

Holland, M., Berry J. & Forster, D. Eds. 1999: ExternE Externalities of Energy Volume 7: Methodology 1998 Update. European Commission, Directorate-General XII, Science, Research and Development. Brussels.

Hvidtfeldt, U., C. Geels, M. Sørensen, M. Ketzel, J. Khan, A. Tjønneland, J. H. Christensen, J. Brandt, O. Raaschou-Nielsen, 2019. Long-term residential exposure to PM_{2.5} constituents and mortality in a Danish cohort. *Environment International*. Volume 133, Part B, December 2019, 105268. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105268>.

Im, U., Christensen, J. H., Nielsen, O.-K., Sand, M., Makkonen, R., Geels, C., Anderson, C., Kuk-konen, J., Lopez-Aparicio, S., and Brandt, J.: Contributions of Nordic anthropogenic emissions on air pollution and premature mortality over the Nordic region and the Arctic, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 12975–12992, <https://doi.org/10.5194/acp-19-12975-2019>, 2019.

Im, U., Brandt, J., Bauer, S.E., Tsigaridis, K., Frohn, L.M., Geels, C., 2023. Present-day and future PM_{2.5} and O₃-related global and regional premature mortality in the EVA_{v6.0} health impact assessment model. *Environmental Research*. 2023 Jan 1;216(Pt 4):114702. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114702>

Jensen, S.S., Winther, M., Løfstrøm, P., Ketzel, M., Frohn, L.M. 2021. Kortlægning af udviklingen i luftforurening fra krydstogtskibe og andre skibe i fem danske havne. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 129 s. – Videnskabelig rapport nr. 413. <http://dce2.au.dk/pub/SR413.pdf>

Jensen, S.S., Berkowicz, R., Hansen, H. Sten. & Hertel, O. 2001: A Danish decision-support GIS tool for management of urban air quality and human exposures. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 6, Issue 4, 2001, pp. 229-241.

Jensen, S.S., Ketzel, M., Becker, T., Christensen, J., Brandt, J., Plejdrup, M.S., Winther, M., Nielsen, O.-K., Hertel, O., Ellermann, T. (2017): High Resolution Multi-scale Air Quality Modelling for All Streets in Denmark. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 52 (2017) 322–339. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.02.019>. Open access.

Jensen, S.S., Winther, M., Løfstrøm, P., Frohn, L.M. 2019. Kortlægning af luftforurening fra krydstogtskibe. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 78 s. - Videnskabelig rapport nr. 316. <http://dce2.au.dk/pub/SR316.pdf>

Jensen, S.S., Ketzel, M., Khan, J., Valencia, V.H., Brandt, J., Christensen, J.H., Frohn, L.M., Nielsen, O.-K. Plejdrup, M.S., Ellermann, T. (2021): Luften på din vej 2.0. DCE-Nationalt Center for Miljø og Energi, 62 s. - Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 445, <http://dce2.au.dk/pub/SR445.pdf>

Johansson, L., Jalkanen, J.-P., and Kukkonen, J. 2017: Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution *Atmospheric Environment* 167, 403-415, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.042>, 2017.

Ketzel, M., Jensen, S.S, Brandt, J., Ellermann, T., Olesen, H.R., Berkowicz, R. & Hertel, O. 2013: Evaluation of the Street Pollution Model OSPM for Measurements at 12 Streets Stations Using a Newly Developed and Freely Available Evaluation Tool. *J Civil Environ Eng*, S1:004. doi:10.4172/2165-784X.S1-004.

Ketzel, M., Frohn, L.M., Christensen, J.H., Brandt, J., Massling, A., Andersen, C., Im, U., Jensen, S.S., Khan, J., Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Manders, A., van der Gon, H.D., Kumar, P., Raaschou-Nielsen, O. (2021): Modelling ultrafine particle number concentrations at address resolution in Denmark from 1979 to 2018 - Part 2: Local and street scale modelling and evaluation. *Atmospheric Environment*, vol. 264, 118633. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118633>.

Khan, J., K. Kakosimos, O. Raaschou-Nielsen, J. Brandt, S.S. Jensen, T. Ellermann, M. Ketzel, 2018: Development and Performance Evaluation of New AirGIS - A GIS Based Air Pollution and Human Exposure Modelling System. Submitted to *Atmospheric Environment*.

Lehtomäki, H., Geels, C., Brandt, J., Rao, S., Yaramenka, K., Astrom, S., Andersen, M. S., Frohn, L. M., Im, U., and Hanninen, O. 2020: Deaths Attributable to Air Pollution in Nordic Countries: Disparities in the Estimates, *Atmosphere-Basel*, 11, ARTN 467.

Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Pöschl, U., Fnais, M., Daiber, A., Münzel, T. Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. *European Heart Journal* 40, 1590-1596. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz135>, 2019.

Miljø- og fødevareministeriet, 2017: Bekendtgørelse om vurdering og styring af luftkvaliteten. Bekendtgørelse nr. 1472 af 12/12/2017 (In Danish). København, Danmark.

Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Mikkelsen, M.H., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Fauser, P., Albrechtsen, R., Hjelgaard, K.H., Bruun, H.G. & Thomsen, M. 2022. Annual Danish Informative Inventory Report to UNECE. Emission inventories from the base year of the protocols to year 2020. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 583 pp. Scientific Report No. 488 <http://dce2.au.dk/pub/SR488.pdf>

Olesen, H.R., Winther, M., Ellermann, T., Christensen, J., Plejdrup, M. 2009: Ship emissions and air pollution in Denmark. Present situation and future scenarios. National Environmental Research Institute, Aarhus University. Environmental Project No. 1307, 2009. Miljøprojekt.

Ottosen, T.-B., Kakosimos, K. E., Johansson, C., Hertel, O., Brandt, J., Skov, H., Berkowicz, R., Ellermann, T., Jensen, S. S. & Ketzel, M. 2015: Analysis of the impact of inhomogeneous emissions in a semi-parameterized street canyon model. I : Geoscientific Model Development Discussions. 8, 3231–3245, 2015. doi:10.5194/gmd-8-3231-2015.

Plejdrup, M.S., Nielsen, O.-K., Gyldenkerne, S. & Bruun, H.G. 2021. Spatial high-resolution distribution of emissions to air – SPREAD 3.0. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 208 pp. Technical Report No. 215 <http://dce2.au.dk/pub/TR215.pdf>

Raaschou-Nielsen, O., E. Thorsteinson, S. Antonsen, G. J Holst, A. Tjønneland, M. Ketzel, T. Sigsgaard, C. Geels, J. Brandt, C. B Pedersen, U. A. Hvidtfeldt, 2020 Air pollution and mortality in the Danish population – a nationwide study. The Lancet EClinicalMedicine. Vol. 28, November 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2020.100605>.

Raaschou-Nielsen, O., Antonsen, S., Agerbo, E., Hvidtfeldt, U.A., Geels, C., Frohn, L.M., Christensen, J.H., Brandt, J., Pedersen, C.B., 2023. PM2.5 air pollution components and mortality in Denmark. Environment International, Volume 171, January 2023, 107685. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107685>.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D., Duda, M. G., Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). University Corporation for Atmospheric Research. doi:10.5065/D68S4MVH.

So, R. J. T. Jørgensen, Y.-H. Lim, A. J. Mehta, H. Amini, L. H. Mortensen, R. Westendorp, M. Ketzel, O. Hertel, J. Brandt, J. H. Christensen, C. Geels, L. M. Frohn, T. Sigsgaard, E. V. Bräuner, S. S. Jensen, C. Backalarz, J. E. Laursen, M. K. Simonsen, S. Loft, T. Cole-Hunter, Z. J. Andersen, 2020. Long-term exposure to low levels of air pollution and mortality adjusting for road traffic noise: A Danish Nurse Cohort study. Environment International. Volume 143, October 2020, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105983>

Stafoggia, M., B. Oftedal, J. Chen, S. Rodopoulou, M. Renzi, R. Atkinson, M. Bauwelinck, J. O. Klompmaker, A. Mehta, D. Vienneau, Z. J. Andersen, T. Bellander, J. Brandt, G. Cesaroni, H. Concin, K. de Hoogh, D. Fecht, J. Gulliver, O. Hertel, B. Hoffmann, U. A. Hvidtfeldt, K.-H. Jöckel, J. Jørgensen, K. Katsouyanni, M. Ketzel, D. T. Kristoffersen, A. Lager, K. Leander, S. Liu, P. Ljungman, P. K. E. Magnusson, G. Nagel, G. Pershagen, A. Peters, O. Raaschou-Nielsen, D. Rizzuto, S. Schramm, P. Schwarze, G. Severi, T. Sigsgaard, M. Sørensen, M. Strak, A. Tjønneland, Y. T. van der Schouw, M. Verschuren, G. Weinmayr, K. Wolf, E. Samoli, F. Forastiere, B. Brunekreef, G. Hoek, N. A. H. Janssen, 2022. Long-term Exposure to Low Ambient Air Pollution Concentrations and Cause-specific Mortality among 28 Million Subjects – Results from seven European administrative cohorts within the ELAPSE Project. *The Lancet Planetary Health*. Volume 6, Issue 1, January 2022, Pages e9-e18. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00277-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00277-1)

Strak, M., G. Weinmayr, S. Rodopolou, J. Chen, K. de Hoogh, Z.J. Andersen, R. Atkinson, M. Bauwelinck, T. Bellander, J. Brandt, G. Cesaroni, H. Concin, D. Fecht, F. Forastiere, J. Gulliver, O. Hertel, B. Hoffmann, U.A. Hvidtfeldt, N.A.H. Janssen, K.-H. Jöckel, J. Jørgensen, M. Ketzel, J.O. Klompmaker, A. Lager, K. Leander, S. Liu, P. Ljungman, C.J. MacDonald, P.K.E. Magnusson, A. Mehta, G. Nagel, B. Oftedal, G. Pershagen, A. Peters, O. Raaschou-Nielsen, M. Renzi, D. Rizzuto, Y.T. van der Schouw, S. Schramm, P. Schwarze, T. Sigsgaard, M. Sørensen, M. Stafoggia, A. Tjønneland, D. Vienneau, K. Wolf, K. Katsouyanni, B. Brunekreef, G. Hoek, E. Samoli, 2021. Long-term exposure to low-level air pollution and mortality in eight European cohorts within the ELAPSE project: pooled analysis. *BMJ*. 2021; 374; n1904 doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.n1904>

Turpin, B.J. & Lim, H.-J., 2010: Species Contributions to PM_{2.5} Mass Concentrations: Revisiting Common Assumptions for Estimating Organic Mass, *Aerosol Science and Technology*, 35: 1, 602 – 610, First published on: 30 November 2010 (iFirst). DOI: 0.1080/02786820119445URL. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/02786820119445>

Vejdirektoratet, 2021: <https://www.vejdirektoratet.dk/side/trafikkens-udvikling-i-tal>. (Besøgt august 2021).

WHO Regional Office for Europe, 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. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/health-risks-of-air-pollution-in-europe-hrapie-projectrecommmendations-for-concentrationresponse-functions-forcostbenefit-analysis-of-particulate-matter,-ozone-and-nitrogendioxide>

WHO, 2014. <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/> (webpage accessed 12/11-2020).

WHO, 2021a. WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

WHO, 2021b. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).

Bilag 1

I overvågningsprogrammet suppleres de permanente målinger med modelberegninger for kvælstofdioxid, $PM_{2,5}$, og PM_{10} på gadeniveau og ozon, på regionalt niveau. Modelberegningerne bliver gennemført med det integrerede multiskala modelsystem DEHM/UBM/AirGIS, som er i stand til at beregne luftforureningskoncentrationer på regionalt niveau og bybaggrunds niveau samt for udvalgte gader på begge vejsider. Modelsystemet DEHM/UBM/AirGIS består af følgende modeller: Danish Eulerian Hemispheric Model, DEHM (Christensen 1997; Brandt et al., 2012), Urban Background Model, UBM (Brandt et al., 2001; Brandt et al., 2003; Frohn et al., 2022) og Operational Street Pollution Model, OSPM® (Berkowicz 2000a; Ketzel et al., 2012).

Dette bilag beskriver kalibrering, justering og dokumentation af modelberegningernes kvalitet.

Modelkalibrering og -validering

I rapporteringen for 2013 blev modelberegningerne med OSPM væsentlig forbedret med revisioner af modellen. Disse forbedringer er relateret til beregning af den generelle bygningshøjde, revision af emissionsfaktorer for kvælstofoxider for Euro 5 og 6 personbiler og brug af nye rejsehastigheder for trafikken baseret på GPS-data fra Vejdirektoratet (SpeedMap) og efterfulgt af rekalibrering af modellen. Bilag 3 i Ellermann et al. (2014) beskriver ændringer og deres indflydelse på modelresultaterne. Modelopsætning for denne rapportering for 2021 er tæt på opsætningen for 2013 og efterfølgende år.

Før 2015 blev kalibrering af OSPM i forhold til kvælstofdioxidmålingerne på gadestationerne gennemført for et enkelt år. Siden rapportering i 2016 anvender vi alle tilgængelige data fra de seneste tre år til kalibrering for at undgå potentielle fluktuationer ved brug af bare et enkelt år til kalibrering. Gadestationen på H.C. Andersens Boulevard har ikke været anvendt til kalibrering pga. at et spring på ca. $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i kvælstofdioxidkoncentrationerne efter omlægningen af vejbanerne førte til, at trafikken kom tættere på stationen i 2010. Stationen blev flyttet i oktober 2016 for at kompensere for ændring i vejbanerne, og siden denne flytning har stationen igen været en del af kalibreringen.

Sammenligning mellem model og målinger for kvælstofdioxidkoncentrationerne for 2021 er vist i tabel A.1.

Sammenligning mellem model og målinger for kvælstofdioxidkoncentrationerne for 2021 viser en overestimering på 9% til 29% for fire ud af fem gadestationer. For den femte gadestation i Odense er overestimeringen på 52%. Den har også i foregående år været signifikant overestimeret. Der er også overestimering på bybaggrunds-, forstads- og landbaggrundsstationer.

De modellerede årsmiddelkoncentrationerne for kvælstofdioxid er væsentligt under EU's grænseværdi på $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, men væsentligt over WHO's retningslinjer på $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, som er overskredet på alle gadestationer, alle af bybaggrundsstationerne samt to af landstationerne.

Tabel A.1. Sammenligning af modellerede og målte årsmiddelkoncentrationer for kvælstofdioxid i 2021.

Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Målinger	Modelresultater	Difference	Model
Gade:				
København/HCAB / 1103	26,7	33,0	24%	DEHM/UBM/OSPM
København/Jagtvej / 1257	19,3	24,9	29%	DEHM/UBM/OSPM
Aarhus / 6153	20,5	22,4	9,4%	DEHM/UBM/OSPM
Aalborg / 8152	20,1	22,6	12%	DEHM/UBM/OSPM
Odense / 9156	12,2	18,4	52%	DEHM/UBM/OSPM
Bybaggrund:				
København / 1259	9,8	12,8	30%	DEHM/UBM
Aarhus / 6160	9,3	11,7	25%	DEHM/UBM
Odense / 9159	7,3	11,1	53%	DEHM/UBM
Aalborg / 8159	8,7	11,6	34%	DEHM/UBM
Forstad:				
Hvidovre / 2650	10,6	10,6	-1%	DEHM/UBM
Landbaggrund:				
Risø / 2090	5,3	9,3	76%	DEHM/UBM
Keldsnor / 9055	6,1	10,2	68%	DEHM/UBM
Ulborg / 7060	3,3	5,3	60%	DEHM/UBM
Anholt / 6001	3,7	7,0	89%	DEHM/UBM

Sammenligning mellem modellerede og målte $\text{PM}_{2,5}$ - og PM_{10} -koncentrationer er vist hhv. i tabel A.2 og tabel A.3. De modellerede data er inklusive modelkalibreringen, som er beskrevet i næste afsnit. De modellerede partikelkoncentrationer for både $\text{PM}_{2,5}$ og PM_{10} på de fire gadestationer ligger forholdsvis tæt på de målte værdier med mindre relative afvigelser fra -8% til 16%. Der er en general overestimering på bybaggrunds-, forstads- og landbaggrundsstationer fra 2% til 20%.

De modellerede $\text{PM}_{2,5}$ -årsmiddelkoncentrationerne er væsentligt under EU's grænseværdi på $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, men væsentligt over WHO's nye retningslinjer på $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, hvilket gælder alle typer af stationer.

For de modellerede PM_{10} -årsmiddelkoncentrationerne er de ligeledes væsentligt under EU's grænseværdi på $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, men væsentligt over WHO's nye retningslinjer på $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for alle stationer.

Tabel A.2. Sammenligning mellem årsmidler af modellerede (inkl. korrektion) og målte PM_{2,5}-koncentrationer i 2021. Målinger i denne tabel er angivet for atmosfæriske standardbetingelser, mens tabellen i kapitel 7 giver værdier under ambiente betingelser. Derfor optræder der minimale forskelle.

Enhed: µg/m ³	Målinger	Modelresultater	Difference	Model anvendt
Gade:				
Copenhagen/H CAB / 1103	10,8	11,9	10%	DEHM/UBM/OSPM
Copenhagen/Jagtvej / 1257	9,7	10,7	10%	DEHM/UBM/OSPM
Aarhus / 6153	9,2	10,2	11%	DEHM/UBM/OSPM
Aalborg / 8152	9,0	9,3	3,6%	DEHM/UBM/OSPM
Bybaggrund:				
Copenhagen / 1259	8,5	9,4	11%	DEHM/UBM
Aarhus / 6160	7,9	9,2	17%	DEHM/UBM
Aalborg / 8159	7,6	8,1	6,5%	DEHM/UBM
Forstad:				
Hvidovre / 2650	8,5	8,6	1,9%	DEHM/UBM
Landbaggrund:				
Risø / 2090	7,7	9,0	18%	DEHM/UBM

Tabel A.3. Sammenligning mellem modellerede og målte PM₁₀-koncentrationer i 2021. Målinger i denne tabel er angivet for atmosfæriske standardbetingelser, mens tabellen i kapitel 7 giver værdier under ambiente betingelser. Derfor optræder der minimale forskelle.

Enhed: µg/m ³	Målinger	Modelresultater	Difference	Model anvendt
Gade:				
København/H CAB / 1103	24,1	22,1	-8,2%	DEHM/UBM/OSPM
København/Jagtvej / 1257	18,1	18,7	3,3%	DEHM/UBM/OSPM
Aarhus / 6153	16,7	19,4	16%	DEHM/UBM/OSPM
Odense / 9156	16,8	19,4	15%	DEHM/UBM/OSPM
Bybaggrund:				
Copenhagen / 1259	13,7	14,8	7,5%	DEHM/UBM
Landbaggrund:				
Risø / 2090	12,8	14,3	12%	DEHM/UBM
Keldsnor / 9055	13,6	16,2	20%	DEHM/UBM

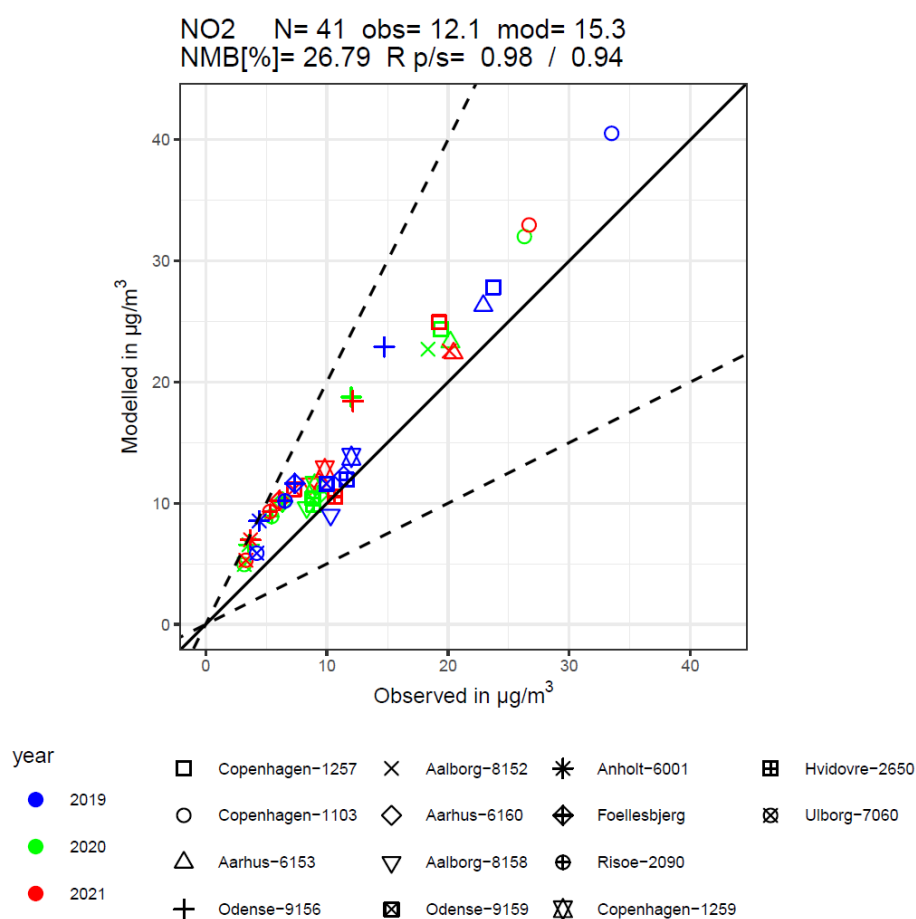
Detaljer om kalibrering af OSPM og validering af modelresultater

For PM_{2,5}/PM₁₀ var kalibrering nødvendigt, da sammenligninger mellem model og målingerne viste en konsistent undervurdering. Den observerede undervurdering var især påfaldende for baggrundstationerne (land- og bybaggrund) og vedrører det ikke-lokale bidrag til PM_{2,5}/PM₁₀, som er modelleret med DEHM og UBM. Det lokale bidrag, modelleret med OSPM, viste sig at være i god overensstemmelse med det målte lokale bidrag, dvs. differencen mellem gade- og bybaggrundstationer. Derfor er kalibrering kun anvendt på modellerede PM-koncentrationer fra DEHM- og UBM-modellerne. Grunden til undervurdering af modellerede PM-koncentrationer ligger i manglende eller underestimerede bidrag, som formodes at være vand bundet i partikler og underestimering af sekundære organiske partikler (SOA) og ikke-udstødningspartikler. Kalibrering medfører, at PM-koncentrationer beregnet med DEHM eller UBM bliver øget med en faktor på 1,33. I alle figurer og tabeller i dette bilag, samt i hele hovedrapporten er vist de kalibrerede PM_{2,5}/PM₁₀-modelresultater.

Nedenunder viser vi en række scatterplots, som illustrerer sammenhængen mellem modelberegningerne og målinger. Figurene indeholder data for årene 2019 til 2021 fra alle stationer: Gade, bybaggrund og landstationer. Vi vælger at inkludere data fra tre år for at have et tilstrækkeligt antal observationer til at vurdere modelperformance med og for at udglatte udsving, som kunne optræde, hvis kun et enkelt år blev brugt.

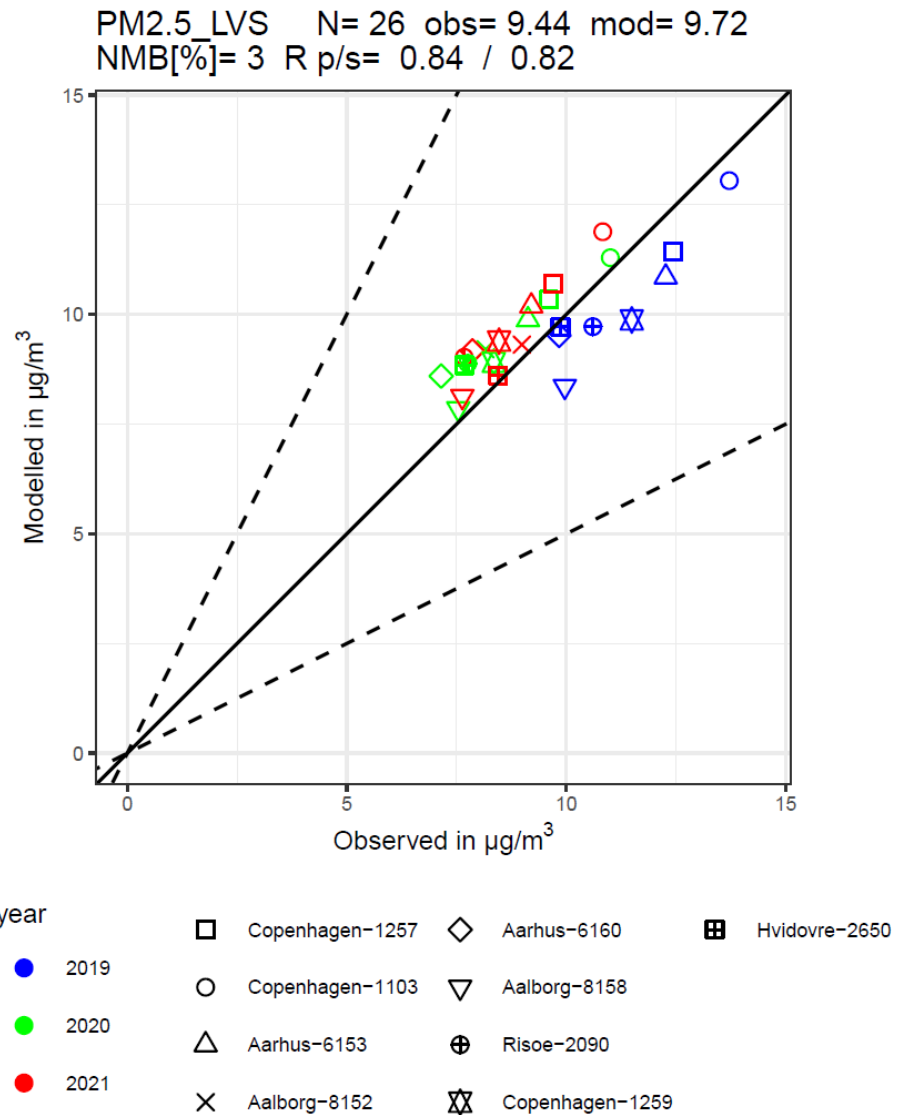
De forskellige målestationer med navn og stationsnumre er angivet i figurenes signaturforklaringer.

I figur A.1 vises korrelation mellem modelleret og målt årsmiddel for kvælstofdioxid fra 2019 til 2021. Der findes 41 datapunkter og det gennemsnitlige målte niveau er $12,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mens modelleret niveau er $15,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Korrelationskoefficienter efter Pearson eller Spearman (R p/s) er meget høj (0,98 / 0,94) og den Normalized Mean Bias (NMB) er tilstrækkelig lav (26,8%) - ca. på niveau med sidste års rapportering.



Figur A.1. Sammenligning mellem korrigerede modellerede og målte årsmiddelkoncentrationer af kvælstofdioxid for alle stationer for 2019-2021.

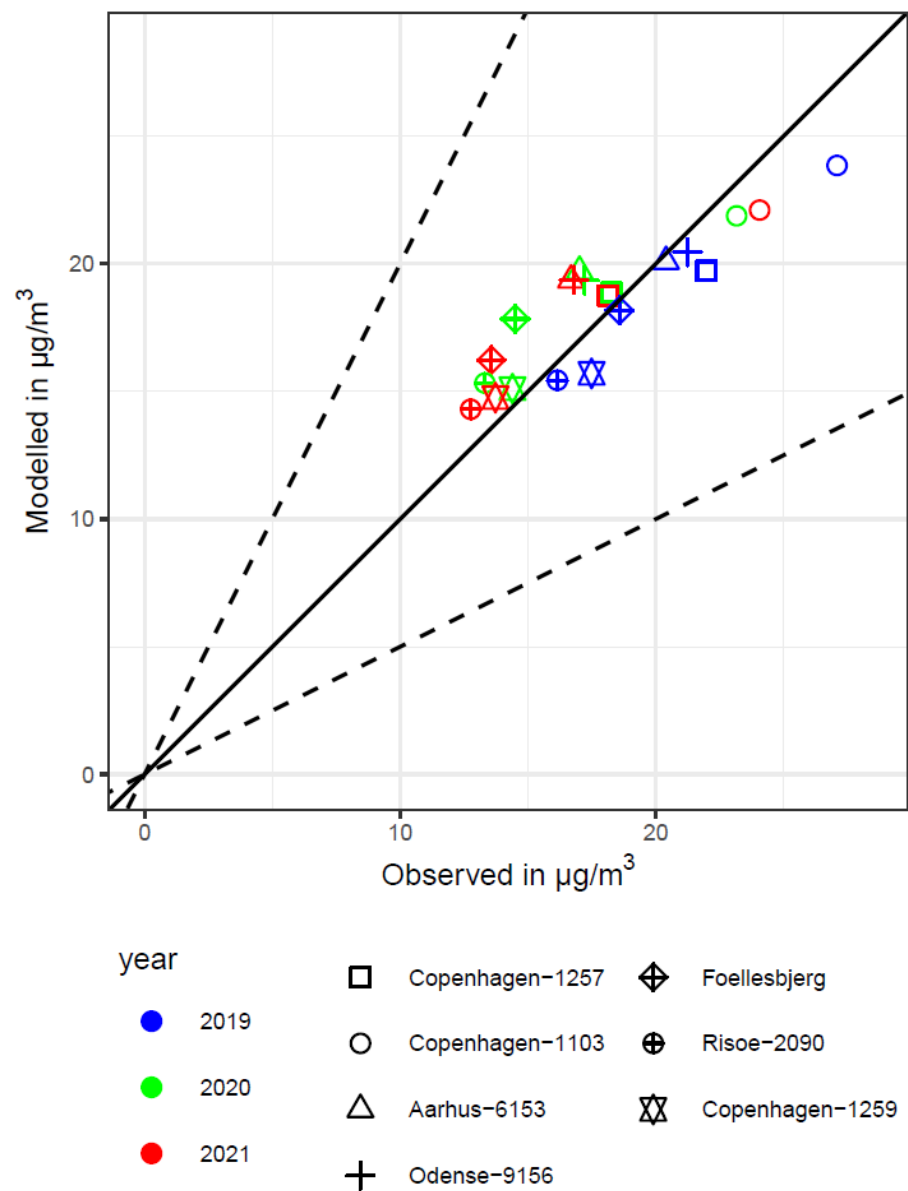
I figur A.2 vises sammenhæng mellem korrigeret modelleret og målt årsmiddel for $\text{PM}_{2.5}$ fra 2019 til 2021. Der findes 26 datapunkter og det gennemsnitlige målte niveau er $9,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mens modelleret niveau er $9,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Korrelationskoefficienter efter Pearson eller Spearman (R p/s) er meget høj (0,84 og 0,82) og den Normalized Mean Bias (NMB) er meget lav (3%), og er på samme niveau i sammenligning med sidste års rapportering.



Figur A.2. Sammenligning mellem de korrigerede modellerede og målte årsmiddelkoncentrationer af PM_{2.5} for alle stationer for 2019-2021.

I figur A.3 vises sammenhængen mellem de korrigeret modelleret og målt årsmiddel for PM₁₀ fra 2019 til 2021. Der findes 21 datapunkter, og det gennemsnitlige målte niveau er 17,9 µg/m³, mens modelleret niveau er 18,4 µg/m³. Korrelationskoefficienter efter Pearson eller Spearman (R p/s) er meget høj (0,89 og 0,86) og den Normalized Mean Bias (NMB) er meget lav (2,6 %), og er på samme niveau i sammenligning med sidste års rapportering.

PM10_LVS N= 21 obs= 17.9 mod= 18.4
 NMB[%]= 2.61 R p/s= 0.89 / 0.86



Figur A.3. Sammenligning mellem korrigerede modellerede og målte årsmiddelkoncentrationer af PM₁₀ for alle stationer for 2019-2021.

LUFTKVALITET 2021

Status for den nationale luftkvalitetsovervågning i Danmark

Rapporten giver en status for 2021 fra den nationale overvågning af luftkvaliteten i Danmark, som har fokus på forureningen i byerne. Formålet med overvågningen er at dokumentere status og følge udviklingen i luftkvaliteten med henblik på at påvise effekten af reduktionstiltag. Endvidere præsenteres data fra de nationale emissionsopgørelser samt resultater fra omfattende modelberegninger af status for og kilderne til helbredseffekterne herunder de økonomiske omkostninger i relation til luftforureningen. I 2021 blev luftkvaliteten målt i de fire største byer og ved fire målestationer i baggrundsområder uden for byerne. I 2021 blev der ikke målt overskridelser af EU's grænse- og målværdier i Danmark, mens hovedparten af WHO's retningslinjer for luftkvalitet fra 2021 blev overskredet. Endvidere blev der gennemført modelberegninger for luftkvaliteten i Aalborg og København. Modelberegningerne viste ingen overskridelse af grænseværdien, men overskridelse af WHO's retningslinjer for luftkvalitet. Luftkoncentrationerne har for langt de fleste luftforureningskomponenter været faldende gennem de seneste årtier, hvilket skyldes faldet i udledningerne i Danmark og de øvrige europæiske lande. Modelberegningerne af helbredseffekterne viser, at der i 2021 var omkring 3.900 for tidlige dødsfald, samt en række andre helbredseffekter som følge af luftforureningen. Antallet af for tidlige dødsfald som følge af luftforureningen er faldet med omkring 52% siden 1990.