



LUFTKVALITET 2022

Status for den nationale luftkvalitetsovervågning i Danmark

Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 580

2024



AARHUS
UNIVERSITET

DCE - NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

LUFTKVALITET 2022

Status for den nationale luftkvalitetsovervågning i Danmark

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 580

2024

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
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. 580
Titel:	Luftkvalitet 2022
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, Martin 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:	Februar 2024
Redaktion afsluttet:	Februar 2024
Faglig kommentering:	Carsten Ambelas Skjøth, 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/580_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, Martin Bjært Sørensen, Mikael Skou Andersen og Torben Sigsgaard. 2024. Luftkvalitet 2022. Status for den nationale luftkvalitetsovervågning. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 154 s. - Videnskabelig rapport nr. 580. http://dce2.au.dk/pub/SR580.pdf
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Rapporten giver en status for 2022 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 2022 blev luftkvaliteten målt i de fire største byer og ved fire målestationer i baggrundsområder uden for byerne. Endvidere blev der udført en ekstraordinær undersøgelse af nord-syd-gradienten af fine partikler i Jylland. I 2022 blev der ikke målt overskridelser af EU's grænse- og målværdier i Danmark, mens hovedparten af WHO's retningslinjer for luftkvalitet, seneste opdateret i 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 udledninger i Danmark og de øvrige europæiske lande. Modelberegningerne af helbredseffekterne viser, at der i 2022 var omkring 3.660 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 55% 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:	978-87-7156-833-2
ISSN (elektronisk):	2244-9981
Sideantal:	154

Indhold

Indhold	3
Sammenfatning	5
Status og udviklingstendens for 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	25
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	52
3.3 Udviklingstendens	53
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	67
6.1 Status for luftkvalitet	67
6.2 Udviklingstendens	68
6.3 Modelberegninger	70
7. Luftbårne partikler	73

7.1	Udledninger	74
7.2	Status for luftkvalitet	77
7.3	Udviklingstendens	79
7.4	Modelberegninger	84
7.5	Undersøgelse af nord-syd-gradient i koncentrationen af PM _{2,5}	87
8.	Elementært – og organisk kulstof	91
8.1	Udledninger	92
8.2	Status for luftkvalitet	93
8.3	Udviklingstendens	94
9.	Tungmetaller	96
9.1	Udledninger	97
9.2	Luftkvalitet	98
9.3	Udviklingstendens	100
10.	Polycykliske aromatiske kulbrinter og benz[a]pyren	103
10.1	Udledninger	103
10.2	Status for luftkvalitet	105
10.3	Udviklingstendens	106
11.	Den kemiske sammensætning af fine partikler	107
11.1	Kilderne til de uorganiske ioner	107
11.2	Status for 2022	108
12.	Helbredseffekter og samfundsmæssige omkostninger relateret til luftforurening	113
12.1	Status og trends for helbredseffekter	116
12.2	Status for luftforureningens samfundsmæssige omkostninger som følge af helbredseffekter	119
12.3	Kilder til helbredseffekter af luftforureningen i Danmark i 2022	120
12.4	Danske og udenlandske kilder til omkostningerne fra luftforureningen i Danmark 2022	124
12.5	Usikkerhed og perspektiver for fremtidige beregninger	129
13.	Luftkvalitet og WHO's nye anbefalinger	131
13.1	Kvælstofdioxid	131
13.2	Carbonmonoxid	133
13.3	Svovldioxid	133
13.4	Ozon	134
13.5	Partikler, PM _{2,5} og PM ₁₀	135
13.6	Sammenfatning	138
14.	Referencer	140
Bilag 1		149
	Detaljer om kalibrering af OSPM og validering af modelresultater	151

Sammenfatning

Rapporten præsenterer resultater for 2022 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.

Hovedformålet med overvågningsprogrammet i relation til de helbredsskadelige effekter af luftforureningen 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 inklusiv en detaljeret opgørelse over kilderne til helbredseffekterne

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.

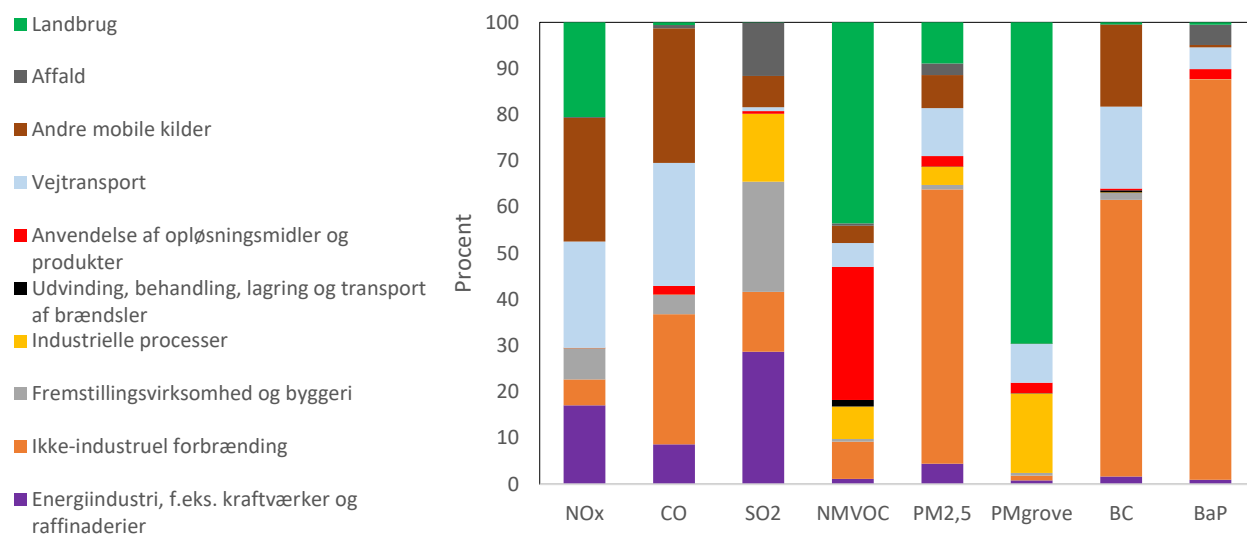
Status og udviklingstendens for udledninger af luftforurening

Rapporten giver en oversigt over udledning af luftforurening fra danske og europæiske kilder. Først gives en status for de vigtigste kilders bidrag til udledningerne i 2021, som er det seneste år opgørelserne er udarbejdet for. Dernæst præsenteres udviklingstendensen for udledningen af de forskellige luftforureningskomponenter fra 1990 til 2021. 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

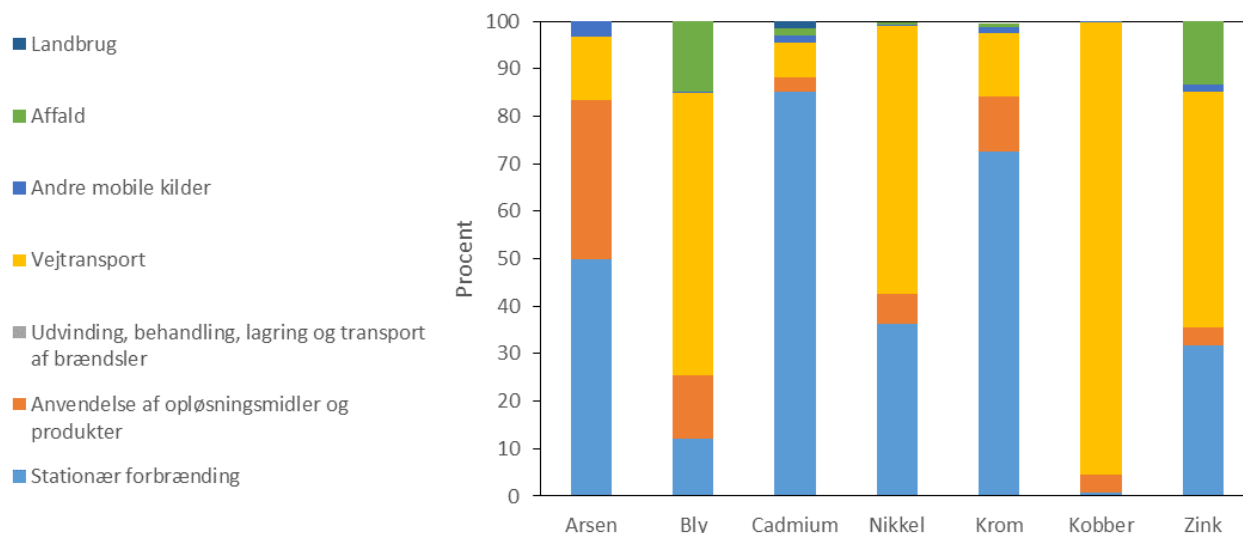
opgørelser over udledningerne, som udarbejdes af DCE for Miljøministeriet (Nielsen et al., 2023) og fra den fælleseuropæiske database over udledningerne fra medlemslandene i EU (CEIP, 2023).

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 forbindelse (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% siden 1990, dog med den mest markante stigning i perioden 1990 og frem til midten af nullerne. Herefter har kobber ligget mere stabilt. 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 2021 opdelt i hovedkategorier (Nielsen et al., 2023). 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. For SO₂ er der i forhold til de foregående år blevet ændret i kildeopgørelserne, således at hele emissionen fra raffinering af olie (der før udgjorde mere end 99,9% det samlede bidrag til *Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler*) fra 2021-opgørelsen, er blevet allokert til *Industrielle processer*, hvorfor det samlede bidrag til *Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler* i 2021 bliver ubetydeligt. For NMVOC er der sket en ændring i metoden for kildeopgørelsen, således at fordelingen mellem kategorien *Industrielle processer* og kategorien *Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler*, er blevet anderledes i 2021 i forhold til opgørelsen de foregående år.



Figur 2. Udledning af udvalgte tungmetaller fra danske kilder i 2021 opdelt i hovedkategorier (Nielsen et al., 2023). 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 Miljøministeriet (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 2022 med både EU's grænse- og målværdier og de nye retningslinjer fra WHO.

I 2022 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 40% under grænseværdien. Luftkoncentrationerne for kvælstofdioxid er faldet med næsten 60% på gademålestationerne siden 2005.

Luftkoncentrationerne for de fine partikler (PM_{2,5}; partikler med diameter under 2,5 µm) overholdt grænseværdien på 25 µg/m³ som årsmiddelværdi på alle målestationer. AEI-værdien (Average Exposure Indicator, som er defineret som middel af tre års gennemsnit af årgennemsnittet af PM_{2,5} i bybaggrund) er faldet med omkring 45% siden 2010. Dermed er det nationale reduktionsmål (15% reduktion siden 2010; EU, 2008) nået. Luftkoncentrationerne er faldet med 30-55% 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 Institutet og ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard viser, at selv ved den mest forurenede målestation på H.C. Andersens Boulevard kommer omkring 75% af forureningen med fine partikler fra udenlandske kilder og kilder i det øvrige Danmark, mens kun omkring 25% af forureningen med fine partikler kommer fra kilder i København.

PM₁₀ (partikler med diameter under 10 µm) 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.

I perioden fra 2016 til 2019 var der tekniske vanskeligheder med måling af antallet af de helt små partikler med diameter fra 11 nm til 41 nm. Derfor præsenterer rapporten resultaterne fra måling af partikelantal for partikler med diameter i området for både 41- 478/550 nm og 11-478/550 nm (mangler data i perioden fra 2016-2019). Antallet af partikler i området fra 11-478/550 nm var omkring 9.100 partikler per cm³ på gademålestationen H. C. Andersens Boulevard, hvilket er omkring en faktor to højere end ved forstadsstationen i Hvidovre og omkring en faktor tre højere end ved by- og landbaggrundsstationen ved henholdsvis H. C. Ørsted Institut og Risø. Siden 2002 er partikelantallet for begge fraktioner faldet med omkring 70% og 60% ved henholdsvis gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard og bybaggrundsmåle-stationen i København. I landbaggrund ved Risø er partikelantallet siden 2005 faldet med omkring 35% for fraktionen fra 11 - 478/550 nm.

Luftkoncentrationerne af elementært kulstof (EC) ligger på omkring 0,5 µg/m³ ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard, mens der er væsentligt lavere koncentrationer i bybaggrund og landbaggrundsmålestationen (omkring 0,2-0,3 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 2022 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-timersmålværdierne ikke må overskrides mere end 25 gange som gennemsnit for tre år. I 2022 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 målestationer i 2022, inklusiv gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard. Tærsklen for information af befolkningen om høje ozonniveauer (timemiddel 180 µg/m³) blev overskredet en gang i 2022. Årsmiddelkoncentrationerne 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 navnlige vejtrafik i byerne.

Middelkoncentrationerne for benz[a]pyren i 2022 var 0,10 ng/m³ og 0,17 ng/m³ på henholdsvis H. C. Andersens Boulevard og ved målestationen i Hvidovre. Målværdien på 1 ng/m³ blev ikke overskredet i 2022. Luftkoncentrationerne på H.C. Andersens Boulevard og Hvidovre er faldet med omkring 60-70% siden 2008.

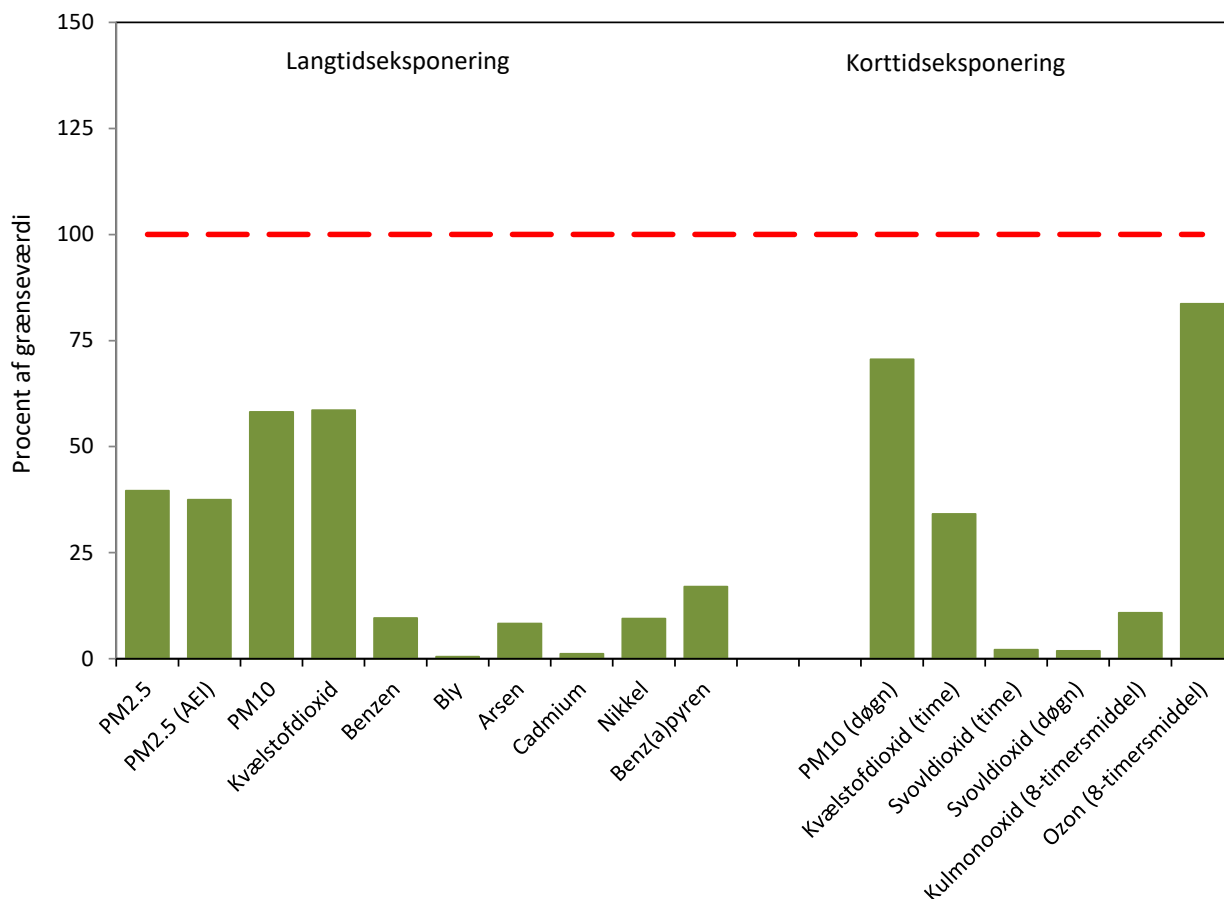
Målinger af 17 udvalgte flygtige organiske forbindelser i bybaggrund i København viste koncentrationsniveauer, som spænder fra 0,02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ til 0,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2022. Benzen er den eneste flygtige organiske forbindelse, hvor der er fastlagt en grænseværdi. I 2022 lå luftkoncentrationerne 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 af 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 80% siden 1990, nikkel med omkring 70% siden 1982 og mangan er faldet med omkring 40% 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. Grænse- og målværdier er indekseret til 100%. For langtidseksponering angiver søjlerne, hvor høj årsmiddelværdien var i procent af grænse- eller målværdien ved den målestation i Danmark, hvor der blev målt den højeste årsmiddelværdi.

For korttidseksponering 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 døgnmiddelkoncentrationen for den 36. højeste døgnmiddelværdi. For 2022 gælder således, at den 36. højeste døgnmiddelkoncentration 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.

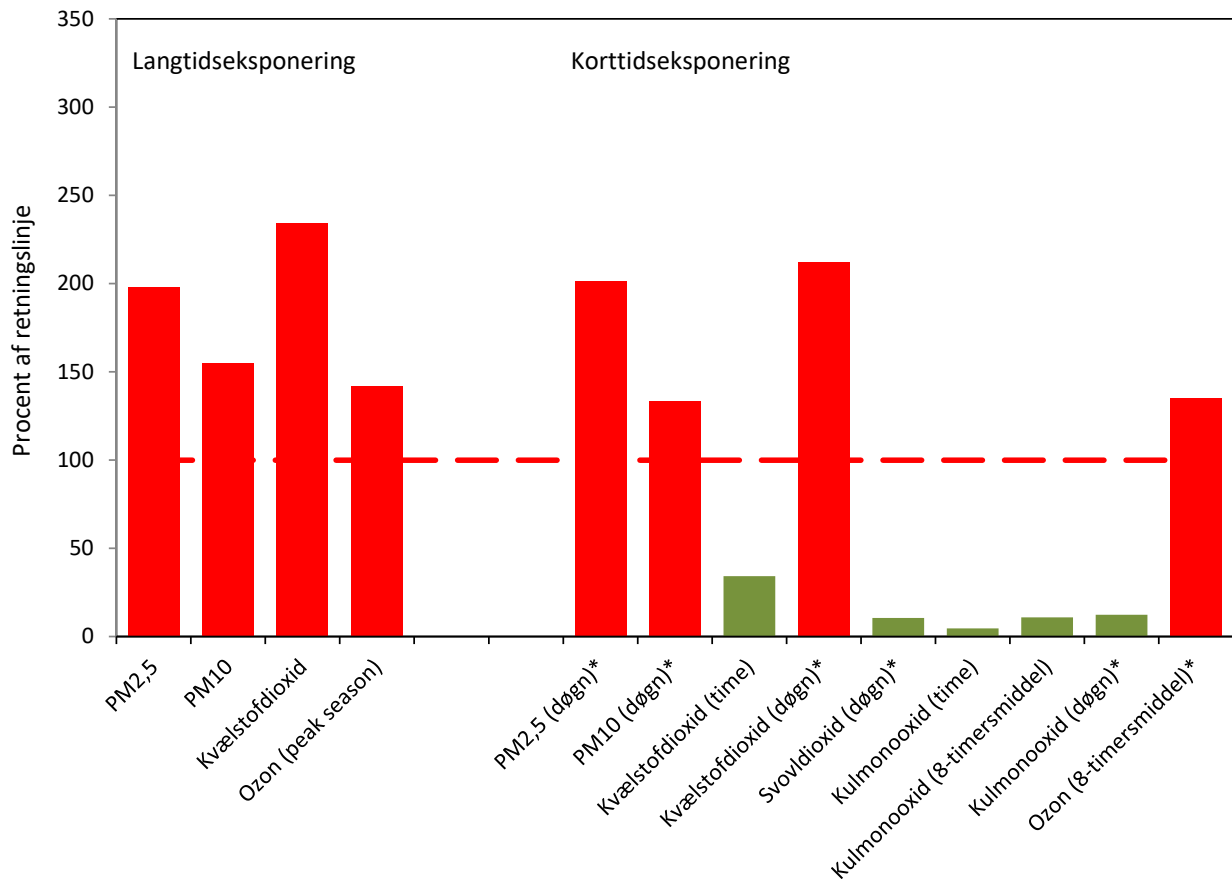
Da alle søjlerne er under 100%, så er der ingen overskridelse af grænse- og målværdierne i 2022.



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 2022. 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). Figur 4 følger samme metodik som Figur 3.

WHO's retningslinjer for langtidseksponering 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%-fraktile af døgnmiddel og den maksimale daglige 8-timers middelværdi. Hvis en parameter er mærket med stjerne, angiver det, at det er 99%-fraktile 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 2022, men WHO's retningslinjer for luftkvalitet fra 2021 overskrides for PM_{2,5} og PM₁₀ på samtlige gadestrækninger i modelberegningerne for 2022. For kvælstofdioxid overskrides WHO's retningslinjer ved alle gadestrækninger i København mens der er overskridelse ved 21 ud af 26 gadestrækninger i Aalborg.

Helbredseffekter og økonomiske omkostninger af luftforureningen

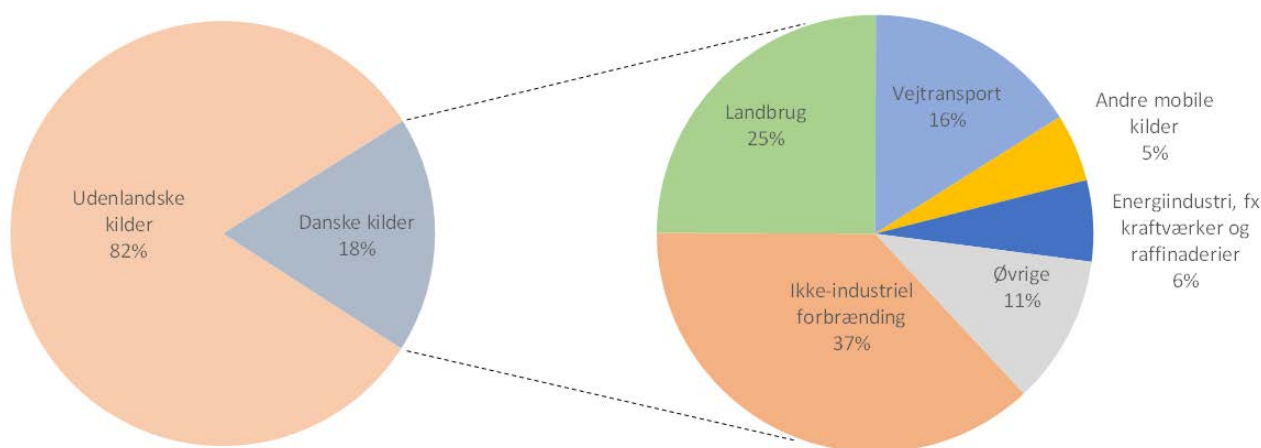
Modelberegningerne af helbredseffekterne viser, at luftforureningen i 2022 er skyld i omkring 3.660 for tidlige dødsfald og en lang række andre negative helbredseffekter. Antallet af for tidlige dødsfald er faldet med ca. 270 i forhold til den seneste årsrapportering, hvilket for hovedparten skyldes ændringer i forudsætningerne for modelberegningerne. Beregningerne viser et fald i helbredseffekterne fra omkring 8.100 tilfælde af for tidlig død per år i 1990 til omkring 3.660 tilfælde per år i 2022. Dette svarer til en reduktion på omkring 55%.

De samlede omkostninger, som følge af luftforureningen i Danmark fra såvel udenlandske som danske kilder, er på omkring 58 milliarder kr. i 2022, hvilket er lidt over gennemsnittet for perioden 2020-2022.

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 670 tilfælde af for tidlig død kan tilskrives udledninger fra danske kilder, hvilket svarer til omkring 18% af det samlede antal for tidlige dødsfald som følge af luftforureningen i Danmark. De resterende omkring 82% 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 1.860 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-industriell forbrænding (navnlige boligopvarmning med brænde), som er ansvarlig for omkring 250 tilfælde svarende til omkring 37% af antal tilfælde af for tidlige dødsfald fra danske kilder. Ikke-industriell forbrænding udgør omkring 7% 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 næst vigtigste 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 denne rapport 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.

Table 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	6,1	1,2	4,0
Ikke-industriel forbrænding	2	36,7	6,9	6,9
<i>Handel og service</i>	201	0,8	0,2	
<i>Husholdninger</i>	202	32,4	6,1	
<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	203	3,5	0,7	
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	2,8	0,5	5,9
Industrielle processer	4	3,0	0,6	1,3
Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	5	0,6	0,1	0,4
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	2,6	0,5	0,4
Vejtransport	7	15,9	3,0	8,4
<i>Udstødning</i>	701-706	8,3	1,6	
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	7,6	1,4	
Andre mobile kilder	8	4,9	0,9	2,7
Affald	9	2,4	0,4	0,6
Landbrug	3b,d,f-i	25,0	4,7	14,0
International skibstransport	-	-	-	11,9
Naturlige kilder	-	-	-	26,4
Samlet		100	18	82

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 middelalderen samtidig er opdateret, og de nye retningslinjer fra WHO også indeholder en ny tærskelværdi for NO₂, har det imidlertid ikke ændret afgørende på antallet af for tidlige dødsfald.

Summary

This report presents results for 2022 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 main aim of the monitoring program in relation to health related effects of air pollution 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 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 2021 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., 2023). 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 since 1990, however, the most pronounced increase is from 1990 to around 2005. After this period the copper concentration is more stable. 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.

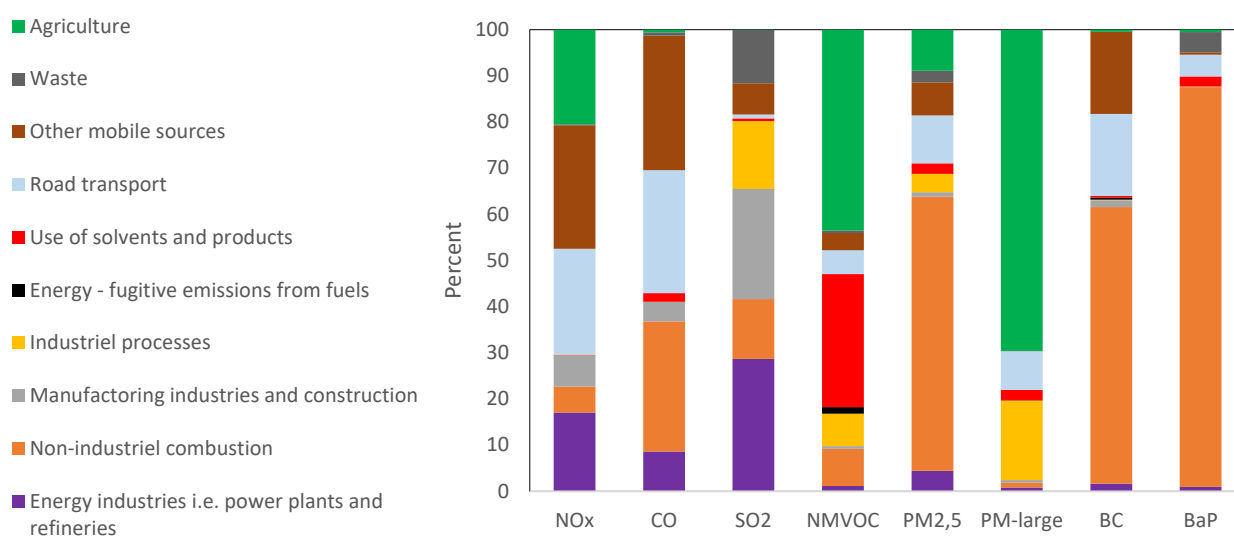


Figure 1. Emissions of selected air pollutants from Danish sources in 2021 grouped in main categories. (Nielsen et al., 2023). The grouping of the sources follows the standards for the international reporting of emissions. The following air pollutants are included: nitrogen oxides (NO_x), carbon monoxide (CO), sulphur dioxide (SO₂), 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. For SO₂ there have been a change in the main emission categories thus that the total emission from oil refining (which used to contribute to more than 99,9% of the total contribution of the category *Energy - fugitive emissions from fuels*) have from the 2021 been allocated to *Industrial processes*, why the total contribution to the category *Energy - fugitive emissions from fuels* in 2021 becomes negligible. For NMVOC there has been a change in the method for the source allocations. Hence, the source categories *Industrial processes* and *Energy – fugitive emissions from fuels* are different in 2021 compared to the previous years.

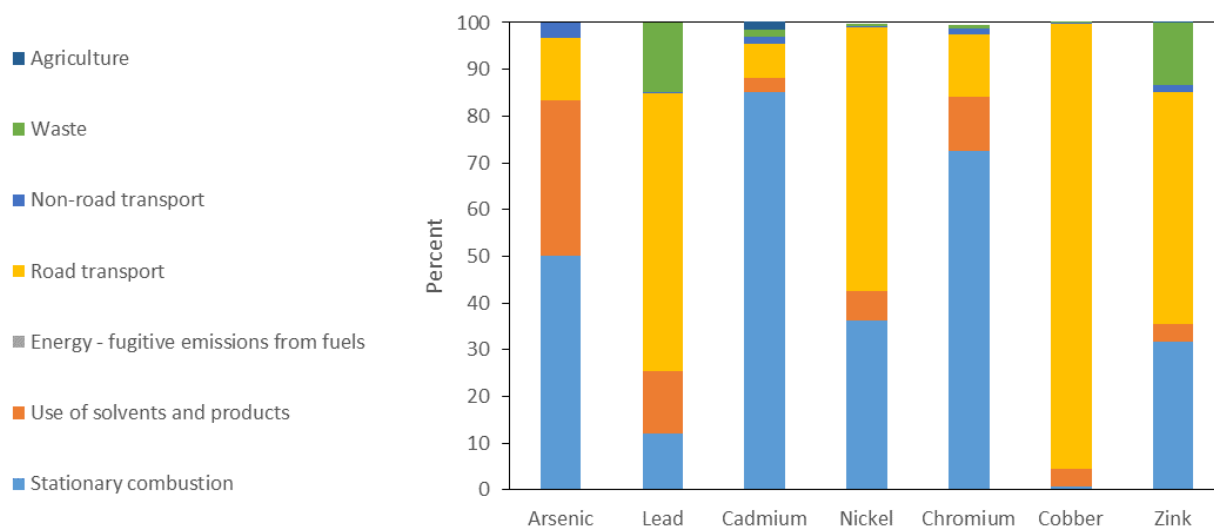


Figure 2. Emissions of selected heavy metals from Danish sources in 2021 grouped in main categories (Nielsen et al., 2023). The grouping of the sources follows the standards for the international reporting of emissions.

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 (Miljøministeriet, 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} (particles with diameter less than $10 \mu\text{m}$) was not exceeded at any monitoring station in the monitoring network in 2022. Likewise, there were no exceedances of the annual limit values for PM_{10} ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and $\text{PM}_{2.5}$ ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$; particles with diameter less than $2.5 \mu\text{m}$). Model calculations at 98 selected street segments in Copenhagen and 26 selected street segments in Aalborg in 2022 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 40% 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 30-55% 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 25% of $\text{PM}_{2.5}$ at H.C. Andersens Boulevard originates from sources in Copenhagen, while about 75% of the concentration of $\text{PM}_{2.5}$ originates from sources in foreign countries and sources in the remaining part of Denmark.

In the period from 2016 to 2019 there was technical difficulties with measurements of particle number concentrations for particles with diameter between 11 to 41 nm. Hence, the annual report presents both data for the particle range from 41- 478/550 nm and 11-478/550 nm (lacks data from 2016 to 2019). The

number of particles in the range 11-478/550 nm was about 9,100 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 60% 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 35% since 2005 for the fraction 11-478/55 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 2022 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 60% 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 $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at the street measurement station at H.C. Andersens Boulevard while the concentrations were considerably lower in the urban and rural background ($0.2\text{-}0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$). 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 2022, 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 except for the street monitoring station at H.C. Andersens Boulevard where there is an increase in ozone due to the reduced emissions of nitrogen oxides from traffic. 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 exceeded once during 2021.

Measurements of volatile organic compounds at the urban background monitoring station in Copenhagen showed concentration levels between $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 2022 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. The concentrations of benzene have decreased with about 90% since 1998.

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 0.10 ng/m³ and 0.17 ng/m³ at H. C. Andersens Boulevard and Hvidovre, respectively. The target value for benzo[a]pyrene (1 ng/m³) was not exceeded in 2022. The annual average concentrations have been reduced with about 60-70% 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 and target values. The limit values for sulphur dioxide 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. The limit and target values are set to 100%. For long-term exposure, the columns show how high the annual averages were in percentage of the limit or target values for the measurement station in Denmark where the highest annual average were measured for each of the parameters. A value above 100% correspond to exceedance and a value equal to or below 100% corresponds to compliance with the limit or target value.

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 2022 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.

All columns in Figure 3 are below 100% and hence there are no exceedances of limit or target values at the Danish measurement stations in 2022.

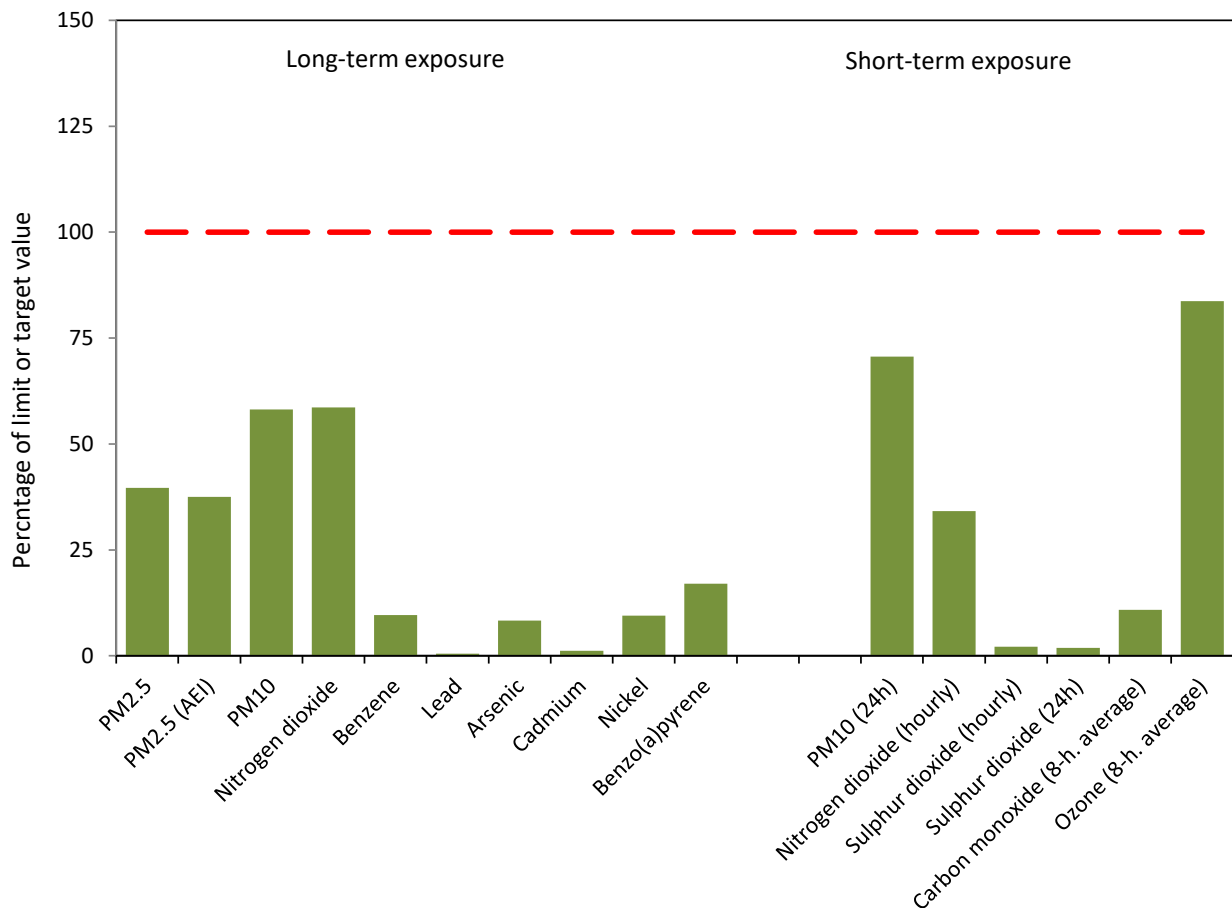


Figure 3. Overview of the Danish compliance with EU's short and long-term limit and target values (EU, 2004; EU, 2008). The long-term limit and target values are based on annual average concentrations while the short-term limit and target values are based on hourly, diurnal or 8-hourly averages. Limit 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 in 2022. 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).

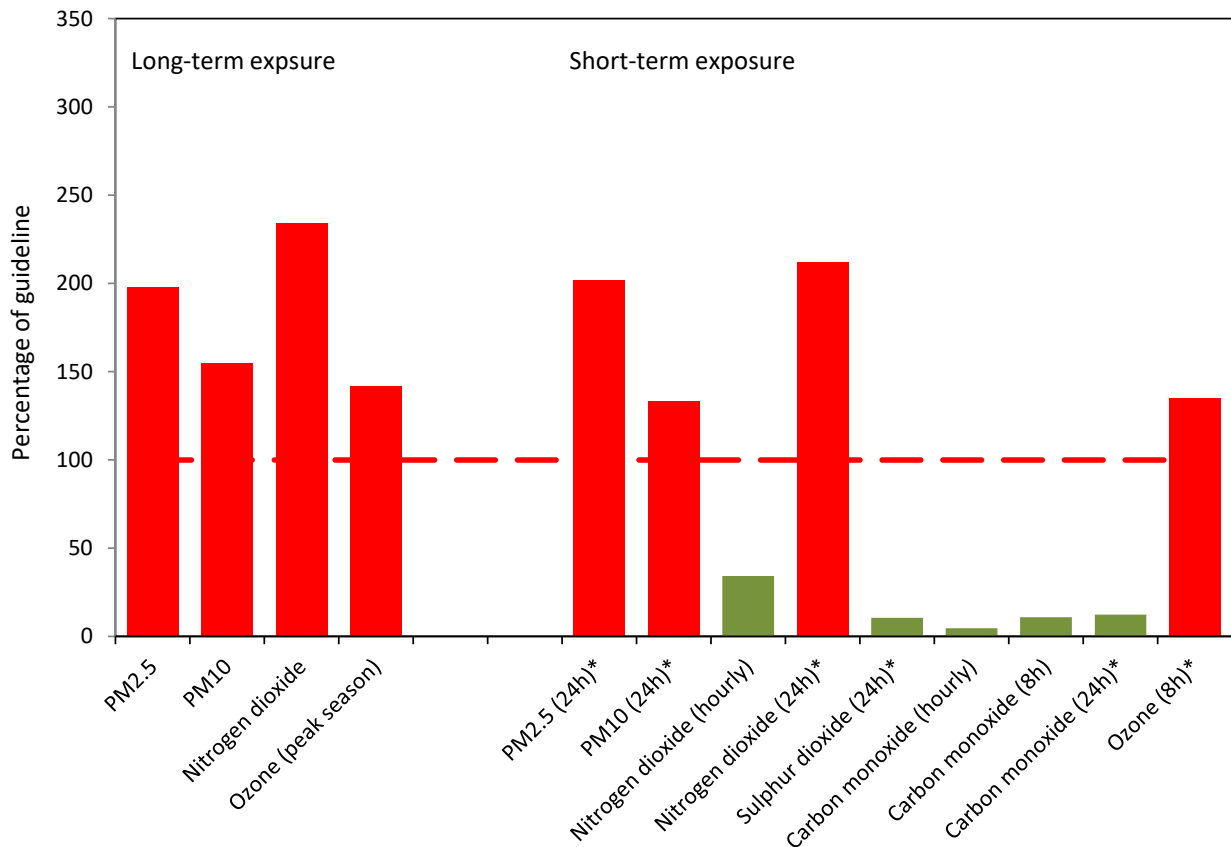


Figure 4. Overview on the exceedances of the new air quality guidelines from WHO (2021a) at the measurement stations in Denmark. The figure is divided according to guidelines regarding long-term and short-term exposure. It is the highest concentrations from the Danish measurement stations that are shown 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 PM_{2.5} and PM₁₀ on all street segments in 2022. The WHO guidelines for nitrogen dioxide are exceeded on all street segments in Copenhagen and 21 out of the 26 street segments in Aalborg.

Health effects and economic costs of air pollution in Denmark

Model calculations show that air pollution causes about 3,660 premature deaths in Denmark in 2022 and many other negative health effects. This is around 240 less than stated in the reporting for 2021. In accordance with WHO recommendations and reflecting demographic changes, there are certain changes in the exposure response functions, background data to the functions and threshold values. Some of these changes lead to a higher number of calculated health impact cases and others to lower calculated health impacts but altogether they do not cause large changes in the estimated health impacts. 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 could be attributed to air pollution in Denmark. This number has decreased to around 3,660 2022 – a reduction of about 55%.

The total health related external costs of air pollution in Denmark from Danish and international sources was about 58 billion DKK in 2022, slightly above the average for 2020-2022.

A detailed analysis of the air pollution related sources of health effects and external costs in Denmark have been carried out as part of this reporting. It shows that within Denmark about 670 premature deaths are due to Danish emissions. This corresponds to about 18% of the total number of premature deaths in Denmark. The remaining 82% are due to emissions outside Denmark. The same pattern is reflected in the economic costs. The model calculations also indicate that Danish emissions are responsible for about 1,860 premature deaths in neighboring and other 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 residential heating with wood burning) responsible for about 250 premature deaths in Denmark corresponding to 37% of the total number of premature deaths due to Danish sources. Danish non-industrial combustion accounts for about 7% 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 important sources.

The uncertainties in estimating health effects and external costs are significant. Leading international researchers have estimated that the uncertainties on their assessments are about $\pm 50\%$ (Lelieveld et al., 2019). DCE estimates that the uncertainties of the health effect and external cost modelling presented in this report are at a comparable level.

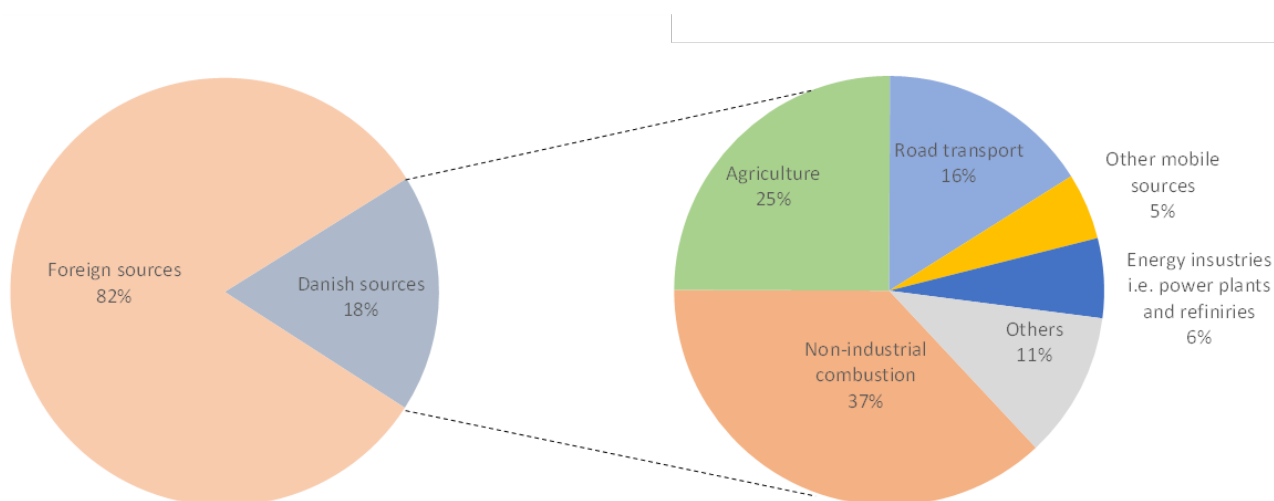


Figure 5. Contribution from Danish and foreign sources to the annual number of premature deaths in Denmark (left) and contributions from Danish sources to the annual number of premature deaths in Denmark (right). For the Danish sources, the five most important categories are shown while the remaining 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	6,1	1,2	4,0
Non-industrial combustion	2	36,7	6,9	6,9
<i>Commercial and institutional</i>	201	0,8	0,2	
<i>Households</i>	202	32,4	6,1	
<i>Agriculture, forestry and aquaculture</i>	203	3,5	0,7	
Manufacturing industries and construction	3	2,8	0,5	5,9
Industrial processes	4	3,0	0,6	1,3
Energy - fugitive emissions from fuels	5	0,6	0,1	0,4
Use of solvents and products	6	2,6	0,5	0,4
Road transport	7	15,9	3,0	8,4
<i>Exhaust</i>	701-706	8,3	1,6	
<i>Non-exhaust</i>	707-708	7,6	1,4	
Other mobile sources	8	4,9	0,9	2,7
Waste	9	2,4	0,4	0,6
Agriculture	3b,d,f-i	25,0	4,7	14,0
International shipping	-	-	-	11,9
Natural sources	-	-	-	26,4
Total		100	18	82

WHO's new guidelines (WHO, 2021a) encompass a thorough review of international research on associations between exposure to a number of air pollutants and impacts on human health. The review finds that health impacts are larger than previously concluded and that impacts on human health can be observed at lower concentration levels than previously documented.

The new guidelines from WHO (WHO, 2021a) are implemented in the estimates of health impacts presented here. This has resulted in changes in the number of premature deaths originating from individual air pollutants. However, the overall number of premature deaths remain approximately the same despite these changes. This is due to simultaneous updates of average life expectancy and that WHO recommendations provide revised thresholds for the health impacts 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 2022) har fokus på overvågning af tilførslen af luftforurening til vandmiljøet og naturen. Denne rapport om luftkvaliteten i 2022 og rapporten om den atmosfæriske deposition i 2022 offentliggøres i februar 2024 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 Miljøministeriet, 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, carbonmonooxid, 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 2022 med både de gamle og nye retningslinjer fra WHO.

I oktober 2022 offentliggjorde EU-kommissionen et forslag til et nyt luftkvalitetsdirektiv, som indeholder 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 nationale emissionslofter (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., 2023).

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.

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

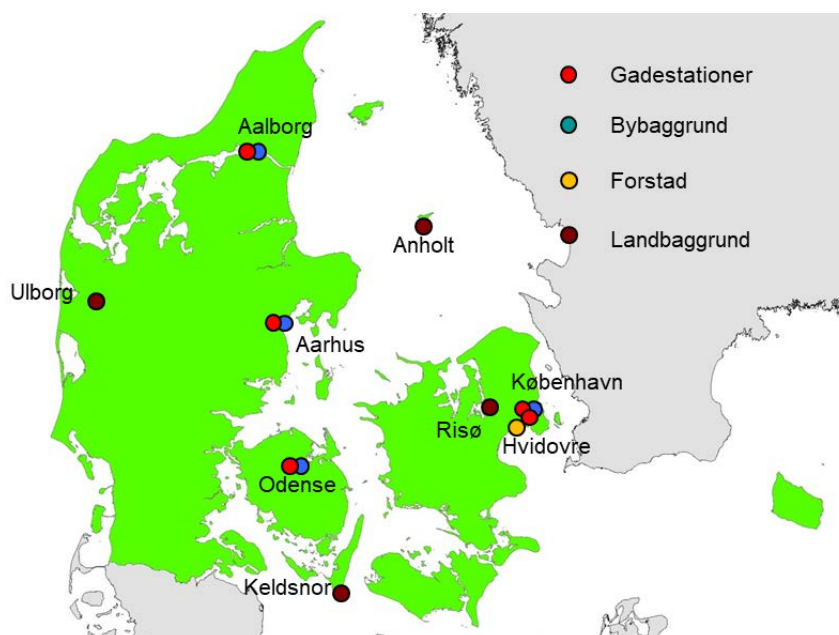
Kategori	Beskrivelsen
Energiindustri	Kraftvarmeverker, raffinaderier og energiforbrug til udvinding af olie og gas
Ikke-industriell forbrænding	Stationær forbrænding i nedenstående kategorier
- Handel og service	f.eks. hospitaler, universiteter
- Husholdninger	f.eks. brændeovne, oliefyr, naturgasfyr
- 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 2021 blev også forbedret på visse områder, hvilket er dokumenteret i Nielsen et al. (2023). I forbindelse med forbedringer af opgørelserne bliver hele tidserien genberegnet, således der forligger konsistente tidsserier for udledningerne.

Baseret på opgørelserne foretages en geografisk fordeling af udledningerne som input til modelberegningerne. Dette foretages i SPREAD-modellen (Plejdrup 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 2022 (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 væsentlige lokale kilder. Disse målestationer betegnes som regionale baggrundsmålestationer.

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.

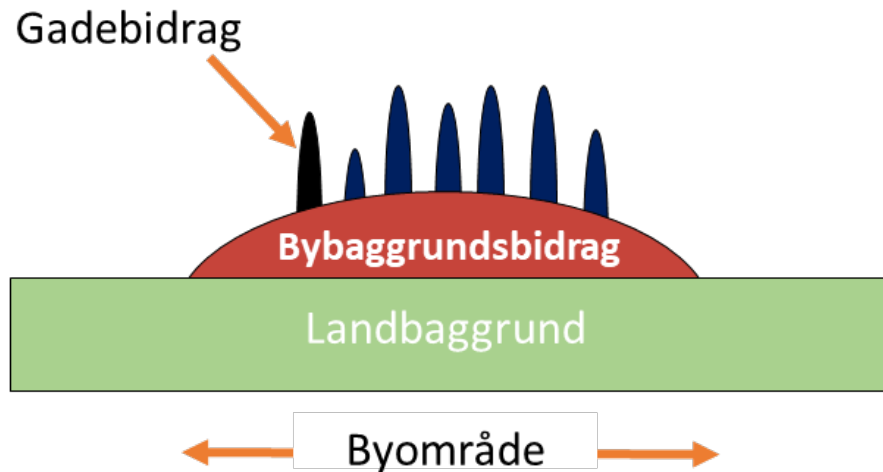
Gademålestation: Målestation placeret i stærkt trafikeret gade.

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 et 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 Miljøstyrelsen.

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 Institut	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.

Table 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 trinvis giver en højere og højere geografisk opløsning af resultaterne, således 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:

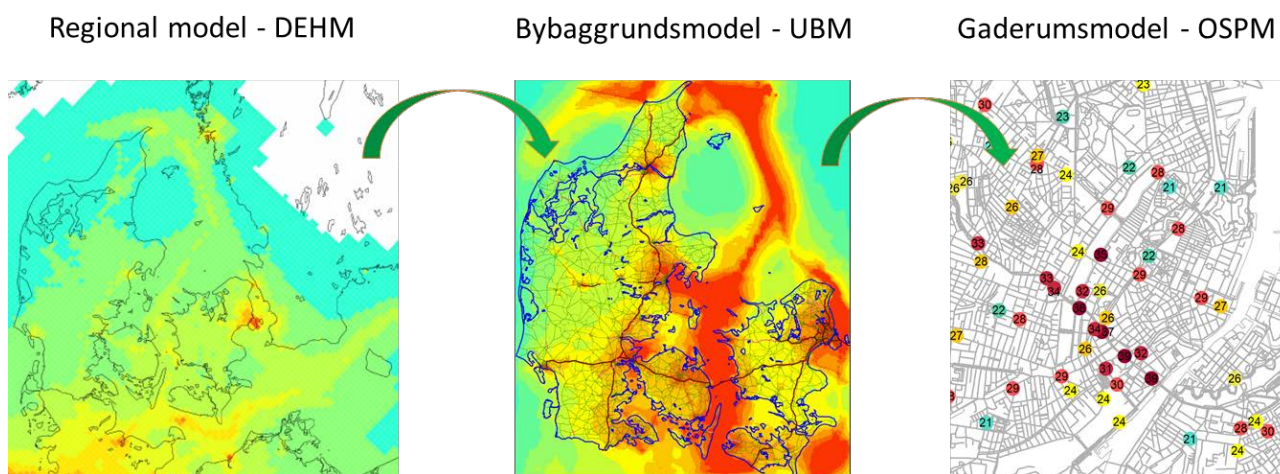
DEHM (Danish Eulerian Hemispheric Model): Denne model dækker hele den nordlige halvkugle og anvendes til beskrivelse af luftforureningen på stor geografisk skala. Modelberegningerne inkluderer beskrivelse af udledningerne, den atmosfæriske transport, de kemiske og fysiske processer i atmosfæren samt 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 Ketzal 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° x 0,2°.

Udledninger: Data om udledningerne baseres hovedsageligt på den danske nationale emissionsopgørelse for 2021 fra DCE (<https://envs.au.dk/en/research-areas/air-pollution-emissions-and-effects/air-emissions/>; Nielsen et al., 2021) og internationale emissionsopgørelser for 2020 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.

Udledningerne for skibe er ligeledes ændret i forhold til tidligere modelberegninger. Ved modelberegningerne præsenteret i årsrapportering fra 2022 er udledningerne baseret 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 tidlig opløsning fra Automatic Identification System (AIS), som gør det muligt at estimere udledningerne fra de individuelle skibe, og tager hensyn til ændringer i bl.a. svovlindhold i skibsbrændstof. Den rummelige opløsning er på 0,1° x 0,1° 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 rummelige fordeling genfordelt for havområderne omkring Danmark ved brug af et specielt STEAM-udledningsdatasæt 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 skibsruiter. Fordelen med det nye datasæt er, at man tager hensyn til variationen af skibsaktiviteterne imellem de enkelte år og de enkelte måneder.

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.

Året 2022 er ikke længere påvirket af COVID-19 restriktioner. Aktiviteterne i samfundet var lavere i årene 2020 og 2021 end i normale år, hvilket påvirkede udledningerne både nationalt og internationalt og dette skal holdes for øje ved sammenligninger mellem resultater fra 2022 og tidligere år.

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 der opnås forbedret overensstemmelse mellem modelresultater og målinger. For 2022 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-responsfunktioner, 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 NO_2 . 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 $10 \mu g/m^3$ stigning i $PM_{2.5}$ (mod tidligere 6,2%).

For langtidseksponering af NO₂ lød den tidligere WHO-anbefaling på at bruge 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.

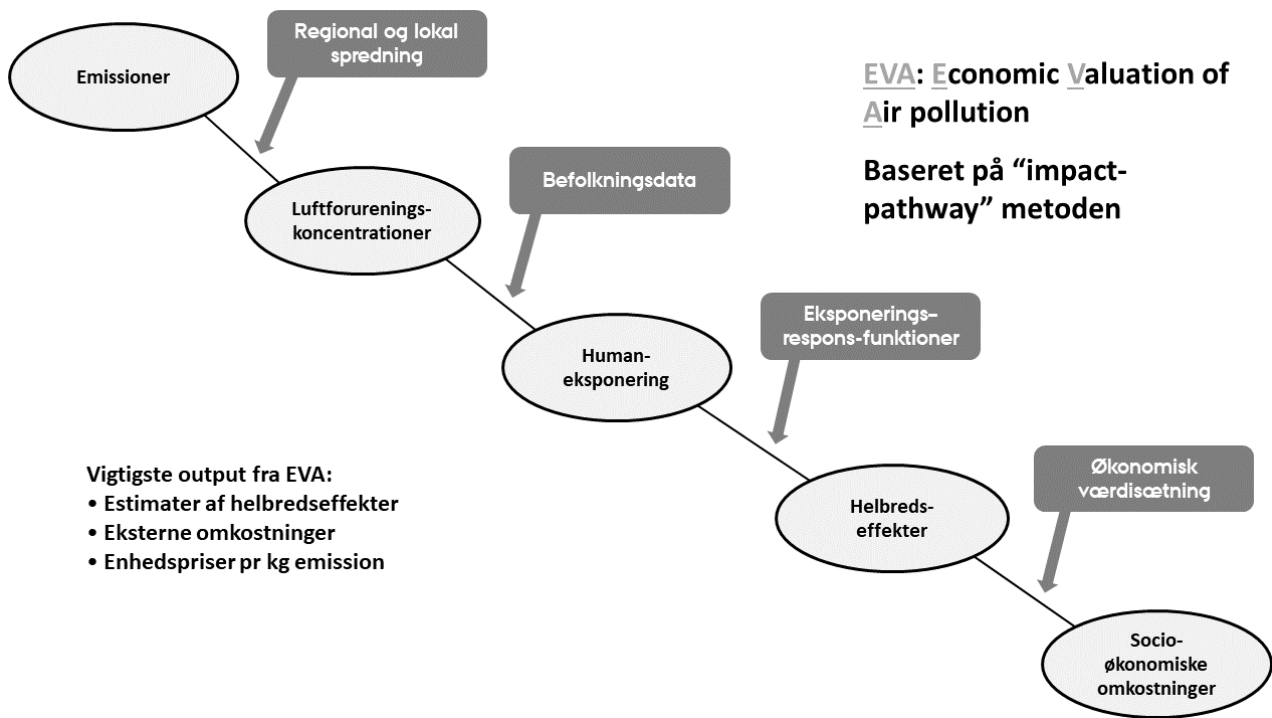
For helbredseffekter relateret til korttidseksponering for NO₂ anvendes nu en døgnmiddelværdi, mod den maximale timekoncentration i løbet af døgnet, der blev anvendt før. Yderligere indikerer gennemgangen af de nyeste studier, at risikoen har været underestimeret, og det anbefales at ændre risikoen fra 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 begrundes 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 højindkomstlande, 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 sensitivitetsberegninger 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. Da eksponerings-responsfunktionerne er baseret på en relativ risiko for at dø tidligere end ellers og middellevetiden er steget generelt i befolkningen, vil det medføre færre for tidlige dødsfald end tidligere. 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 2022 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.

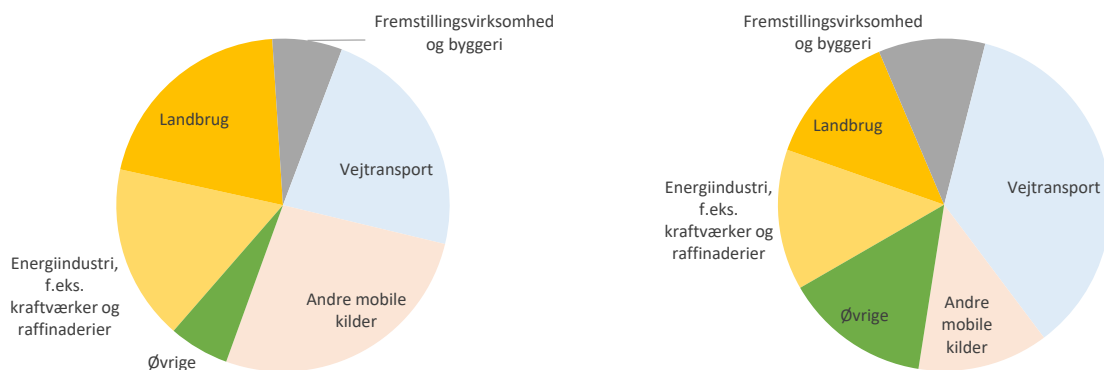
2.1 Udledninger

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 2021 kom den største andel af de danske udledninger af kvælstofoxider fra andre mobile kilder og vejtransport, som hver bidrager med omkring hhv. 27% og 23% af udledningerne (Figur 2.1 og Tabel 2.1; Nielsen et al., 2023). Landbrug og energiindustri 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., 2023). Det største fald er sket for energiindustri (omkring 84%), som i begyndelsen af 1990'erne var den største kilde sammen med vejtransportsektoren. Udledningerne fra vejtransport er også faldet betydeligt (omkring 81%), 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 (kraftvarmeværker 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.

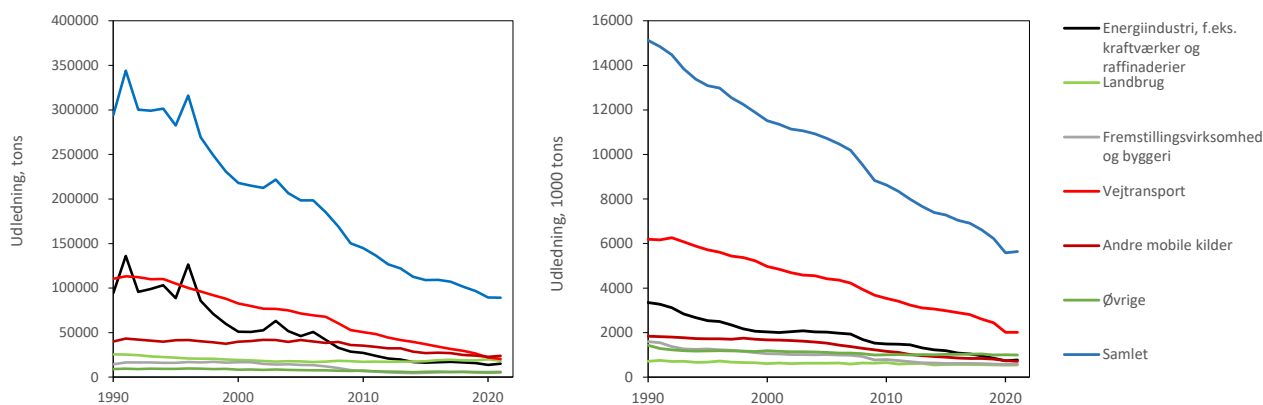


Figur 2.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af kvælstofoxider i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2021. Figureerne viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2023, CEIP, 2023).

Tabel 2.1. Kilderne til de menneskeskabte udledninger af kvælstofoxider i Danmark i 2021 (Nielsen et al., 2023). 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 2021	
		Tons	%
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	15235	17
Ikke-industriel forbrænding	2	4999	6
<i>Handel og service</i>	201	746	1
<i>Husholdninger</i>	202	3564	4
<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	203	689	1
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	6053	7
Industrielle processer	4	21	0
Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	5	0	0
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	49	0
Vejtransport	7	20536	23
<i>Udstødning</i>	701-706	20536	23
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	0	0
Andre mobile kilder*	8	23916	27
Affald	9	157	0
Landbrug	3b,d,f-i	18326	21
Samlet		89292	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., 2023; 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 2022. Årsmiddelværdierne 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 40% 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. I forhold til grænseværdien var timemiddelværdierne af kvælstofdioxid meget lave, og der var ingen overskridelse af grænseværdien for timemiddelværdien af kvælstofdioxid i 2022.

Der er dermed ingen overskridelse af de to grænseværdier for kvælstofdioxid i 2022.

Tabel 2.2. Årsmiddelkoncentrationer for NO₂ og NO_x i 2022, samt højeste timemiddelværdi for NO₂. Desuden grænseværdierne for NO₂, der er baseret på årsmiddelværdi og timemiddelværdi, hvor timemiddelværdi højest må overskride 200 µg/m³ i 18 dage på et kalenderår (EU, 2008). NO_x angives i ækvivalenter af NO₂ (µgNO₂/m³), hvilket er standard i forbindelse med EU's luftkvalitetsdirektiv (EU, 2008). EU kræver en dækningsgrad på mindst 85% af kalenderåret. På basis heraf vurderes datadækningen at være tilstrækkelig på alle målestationer bortset fra Jagtvej.

	Datadækning %	NO ₂ Årsmiddel µg/m ³	NO ₂ Højeste time-middelværdi µg/m ³	NO ₂ Antal dage med timemiddelværdi over 200 µg/m ³	NO _x Årsmiddel µg/m ³
Grænseværdi		40		18	
<i>Gade</i>					
København, H.C. Andersens Boulevard	94	23	136	0	45
København, Jagtvej*	10	15*	79*	0	27*
Odense, Grønløkkevej	93	12	82	0	22
Aarhus, Banegaardsgade	95	19	97	0	35
Aalborg, Vesterbro	92	16	107	0	31
<i>Bybaggrund</i>					
København	94	9,5	88	0	11
Odense	87	6,4	64	0	7,3
Aarhus	94	9,1	79	0	11
Aalborg	90	8,1	71	0	11
<i>Forstad</i>					
Hvidovre	88	9,5	95	0	12
<i>Landbaggrund</i>					
Anholt	88	3,4	59	0	3,9
Keldsnor	87	6,1	88	0	7,0
Risø	95	5,0	59	0	5,6
Ulborg	86	2,9	30	0	3,1

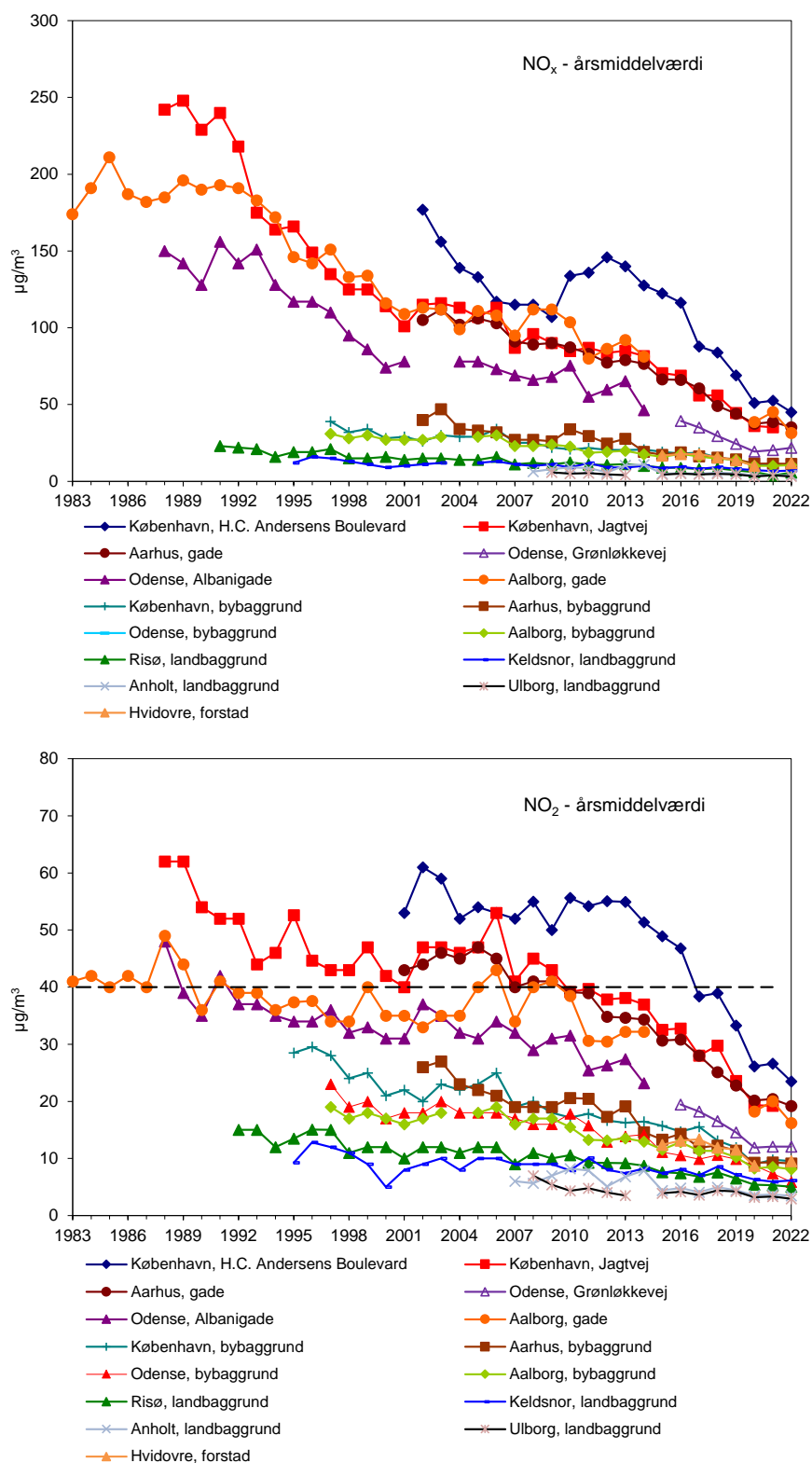
*Grundet omfattende vejarbejde på Jagtvej var målestationen midlertidigt lukket, så der er kun data fra omkring 10% af året.

For kvælstofdioxid ses en væsentlig forskel mellem de målte koncentration-niveauer ved de fem gademålestationer, hvilket primært skyldes forskel i udladninger fra trafikken i de gader, hvor målestationerne er placeret. Endvidere ses også en forskel mellem årsmiddelkoncentrationerne ved gademålestationerne (12-23 µg/m³), bybaggrund (6-10 µg/m³), forstad (9,5 µg/m³) og på landbaggrundsmålestationerne (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 NO_x og NO₂. Fra 2021 til 2022 er der sket et tydeligt fald i koncentrationniveauerne. For NO_x ses et markant fald siden målingernes begyndelse i 1983. For gademålestationerne er der sket et fald på omkring 85% siden begyndelsen af målingerne. For NO₂ 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. Fra omkring

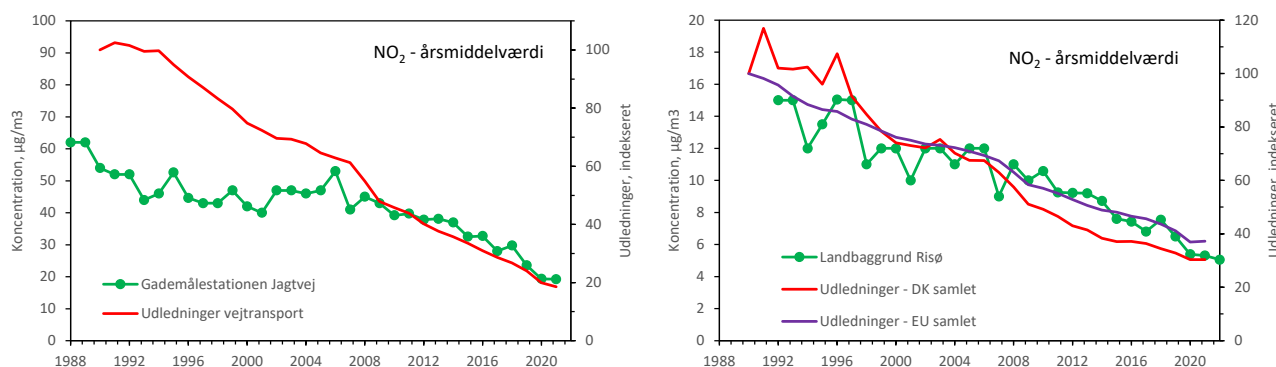
2005 og til i dag er der tilgængæld sket en markant reduktion på næsten 60%. De stærkt faldende koncentrationsniveauer afspejler det løbende fald, som ses i udledningerne, mens variationerne fra år til år også påvirkes af de naturlige variationer i de meteorologiske forhold.



Figur 2.3. Udviklingstendens for årsmiddelværdier af NO_x (øverst) og NO₂ (nederst). 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., 2020a).

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 køretøjs sammensætning med stigende andel af dieseldrivelser og stigende andel af oxiderende katalysatorer på dieseldrivelserne. 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 dieseldrivelser med katalysatorer, som stærkt begrænser udledningerne af kvælstofoxider fra dieseldrivelserne, 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.



Figur 2.4. Udviklingen i luftkoncentrationer af kvælstofdioxid (venstre) ved gademålestationen på Jagtvej og udviklingen i luftkoncentrationer af kvælstofdioxid i landlig baggrund ved Risø (højre). Udviklingen sammenholdes med udviklingen i de relative udledninger af kvælstofoxider (højre akse, indekseret til 100 i 1988) (Nielsen et al., 2023, CEIP, 2023). I begge figurer er akserne skaleret for at muliggøre en visuel sammenligning af udviklingen i luftkoncentrationer og udledninger.

2.4 Modelberegninger

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.

Der er foretaget modelberegninger med henblik på at bestemme de årlige middelkoncentrationer af NO₂, PM_{2,5} og PM₁₀ for at kunne sammenholde med EU's grænseværdi og WHO's retningslinjer for luftkvalitet.

Både København og Aalborg er blandt de fem miljøzonebyer i Danmark. Effekten af de skærpede miljøzoner vedtaget i 2019 er indregnet. De skærpede

krav omfatter pr. 1. januar 2022, at alle lastbiler og busser (både bybusser og turistbusser) skal være mindst Euro 6 eller have monteret et partikelfilter. De skærpede krav for dieselvarebiler omfatter pr. 1. juli 2022, at dieselvarebiler skal være mindst Euro 5 eller med monteret partikelfilter. Kravene er regnet som fuldt implementeret i 2022.

På baggrund af nummerpladeanalyse koblet til motorregisteret har det været muligt at estimere andelen af elbiler. Andelen af elbiler varierer mellem 10% og 18% i miljøzonebyerne (København/Frederiksberg, Aarhus, Odense, Aalborg). Oplysninger fra trafiksekskaberne viser, at andelen af elbusser ligger på 30-40%. Data fra national statistik om andelen af eltaxi er anvendt, og ligger på 17%. Denne elektrificering bidrager til lavere emissioner af kvælstofoxider.

Covid-19-restriktioner påvirkede til en vis grad trafikken i 2021 baseret på oplysninger fra Vejdirektoratet fra 30 tællesteder i Danmark (Vejdirektoratet, 2022). Efter sommerferien i 2021 lå trafikken atter på niveau med eller lidt over trafikken i 2019. I 2022 er trafikken derfor ikke justeret for påvirkning af Covid-19-restriktioner. Trafikken i 2020 og 2021 var påvirket af covid-19-restriktioner, hvilket har betydning i sammenligning af modelresultaterne for luftkvalitet i 2022 med situationen i 2020 og 2021.

2.4.1 Modelberegninger for København

Modelberegningerne af årsmiddelkoncentrationen af kvælstofdioxid for gadestrækninger i København i 2022 vises i Figur 2.5 som søjlediagram og i Figur 2.6 som kort. Gennemsnittet af årsmiddelkoncentrationerne for kvælstofdioxid i alle 98 gadestrækninger faldt betydeligt fra 2021 til 2022 med omkring $4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, heraf omkring $2,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pga. reduktion af bybaggrundskoncentrationen (resultaterne for 2021 kan findes i Ellermann et al., 2023). Målingerne på H.C. Andersens Boulevard viser et betydelig fald med omkring $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i årsmiddelkoncentrationerne af kvælstofdioxid fra 2021 til 2022, og bybaggrundsstationen på H.C. Ørsted Institutet samt landstationen på Risø viser et lille fald. For Jagtvej findes der meget få målinger i 2022 pga. vejarbejde.

Ændringer i gadekoncentrationerne er et resultat af en kombination af ændringer i trafikken, bedre viden om udledningsfaktorer for vejtrafikken, baggrundskoncentrationer og meteorologi.

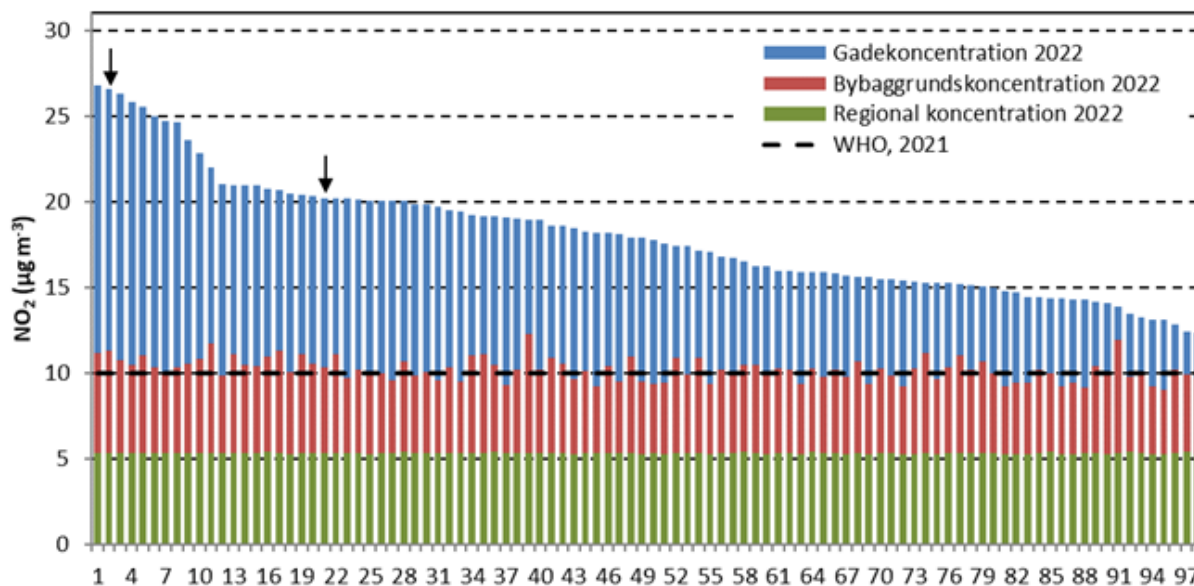
ÅDT (årsdøgntrafik - dvs. gennemsnitlig døgntrafik over et år) var mellem 4.000 og 79.000 køretøjer om dagen i København baseret på trafiktællinger udført i efteråret 2022. Den gennemsnitlige trafik for de 98 gader var stort set uændret fra 2021 til 2022 dog med et meget lille fald i den gennemsnitlige trafik på 1% 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.

Udledningsfaktorerne for køretøjer viser et fald som følge af den generelle udskiftning af køretøjsparken, hvor stigningen i andel af Euro 6-køretøjer med lave udledninger og udskiftning af ældre køretøjer med højere udledninger spiller en væsentlig rolle kombineret med effekten af de skærpede miljøzonekrav og øget elektrificering af trafikken. Den direkte andel af kvælstofdioxid i udstødningen (den procentvise andel af

kvælstofdioxid set i forhold til den samlede udledning af kvælstofoxider) er uændret på 12% som i 2021. Alt andet lige, vil lavere udledningsfaktorer føre til lavere modelberegnete koncentrationer af kvælstofdioxid.

Gadekoncentrationerne viser et betydelig fald fra 2021 til 2022. Dette er en kombination af stort set samme trafik, lavere udledningsfaktorer, lidt lavere baggrundskoncentration, og meteorologien har også spillet en rolle med lidt højere vindhastigheder i 2022 i forhold til 2021. Både modelberegningerne og målinger viser et fald i koncentrationsniveau fra 2021 til 2022.

Sammenligning mellem modelberegninger og målinger er i Bilag 1.



Figur 2.5. Årsmiddelkoncentrationer for kvælstofdioxid i 2022 for 98 udvalgte gadestørkninger i København baseret på modelberegninger. Bidraget fra trafikken i gaderne er baseret på gadeluftkvalitetsmodellen OSPM® (blå farve). Bybaggrundsbidraget (rødlig farve) er baseret på beregninger med baggrundsmodellen UBM med input fra den regionale langtransportmodel DEHM (grøn farve). Værdien for en gadestørkning er for den side af gaden, der har den højeste årsmiddelkoncentration af de to sider. For gader med en målestation er det den side, hvor stationen er placeret. Navnene på gaderne kan ses i tabel 2.3. Pile angiver gadestørkninger med en målestation.

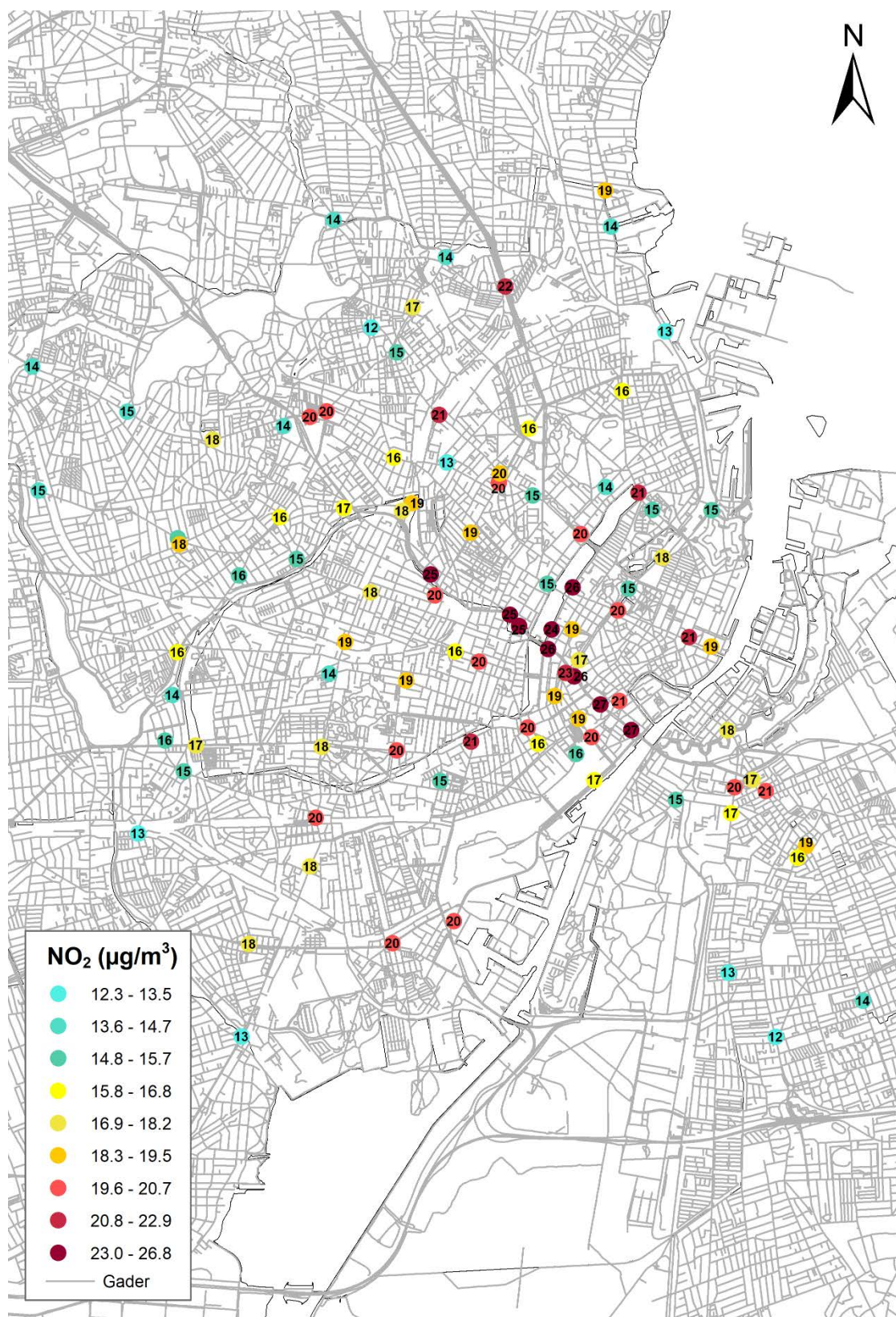
Navnene på de 98 gadestørkninger angives i Tabel 2.3, og gadernes placering og de modelberegnete årsmiddelkoncentrationer kan ses i Figur 2.6.

Der er sket mindre ændringer i rangordningen af gaderne fra 2021 til 2022, hvilket primært er på grund af små ændringer i trafikken. Den højeste modelberegnete årsmiddelkoncentration for kvælstofdioxid i 2022 var på H.C. Andersens Boulevard (1) med $26,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Den anden højeste er, hvor målestationen er placeret på H.C. Andersens Boulevard, mens årsmiddelkoncentrationen er den 21. 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.

Table 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 2022 (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 gadestrækning med en målestation.

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



Figur 2.6. Kortet viser placeringen af de udvalgte gadestrekninger i København og årsmiddelkoncentrationer for kvælstofdioxid i 2022. 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 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. Navne og numre for gaderne er vist i Tabel 2.3. Kortet kan ses som en web-GIS-tjeneste, se <https://augis.au.dk/portal/apps/mapviewer/index.html?web-map=7f8b312b059a42438aca8e55665e9f0c>

2.4.2 Modelberegninger for Aalborg

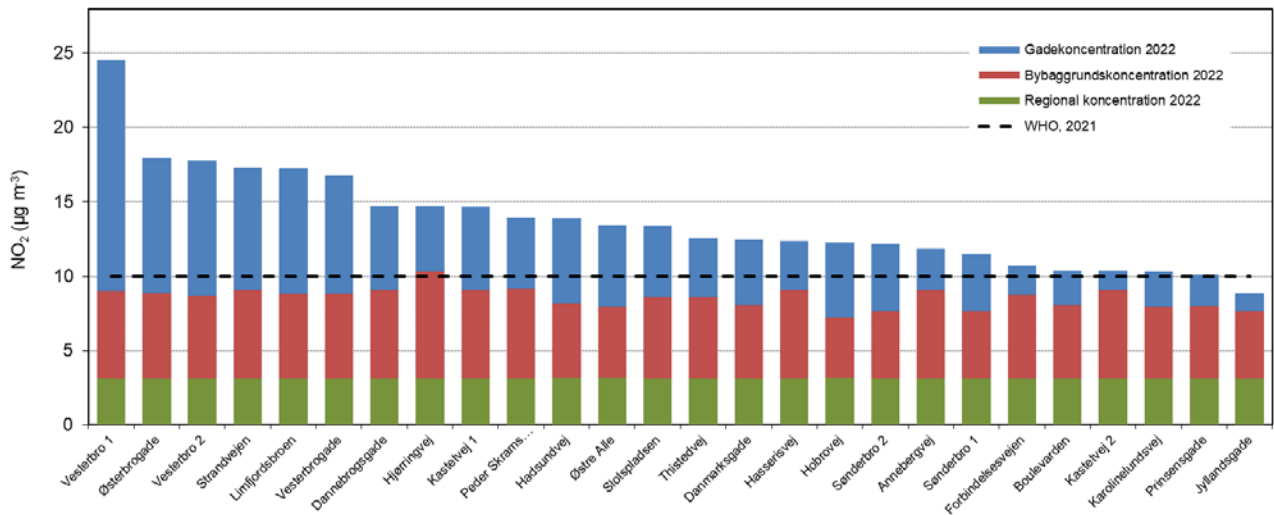
Fra 2018 til 2019 blev der lavet ændringer i udvalgte gadestrækninger, der laves modelberegninger for. Ændringerne er sket for at skabe størst mulig sammenhæng mellem de gader, hvor Aalborg Kommune jævnligt gennemfører trafiktællinger for at sikre det bedst mulige trafikale grundlag for luftkvalitetsberegningerne. 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 2022.

ÅDT var mellem 1.900 og 28.500 køretøjer om dagen i Aalborg. I gennemsnit er ÅDT marginalt lavere i 2022 i forhold til 2021. Den samlede trafik er faldet med omkring 0,1%, som dækker over lidt flere personbiler og noget færre tunge køretøjer. Andelen af tung trafik er i gennemsnit 5,2%. 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 sammen med skærpede miljøzoner og elektrificering, alt andet lige, til lavere udledninger fra trafikken.

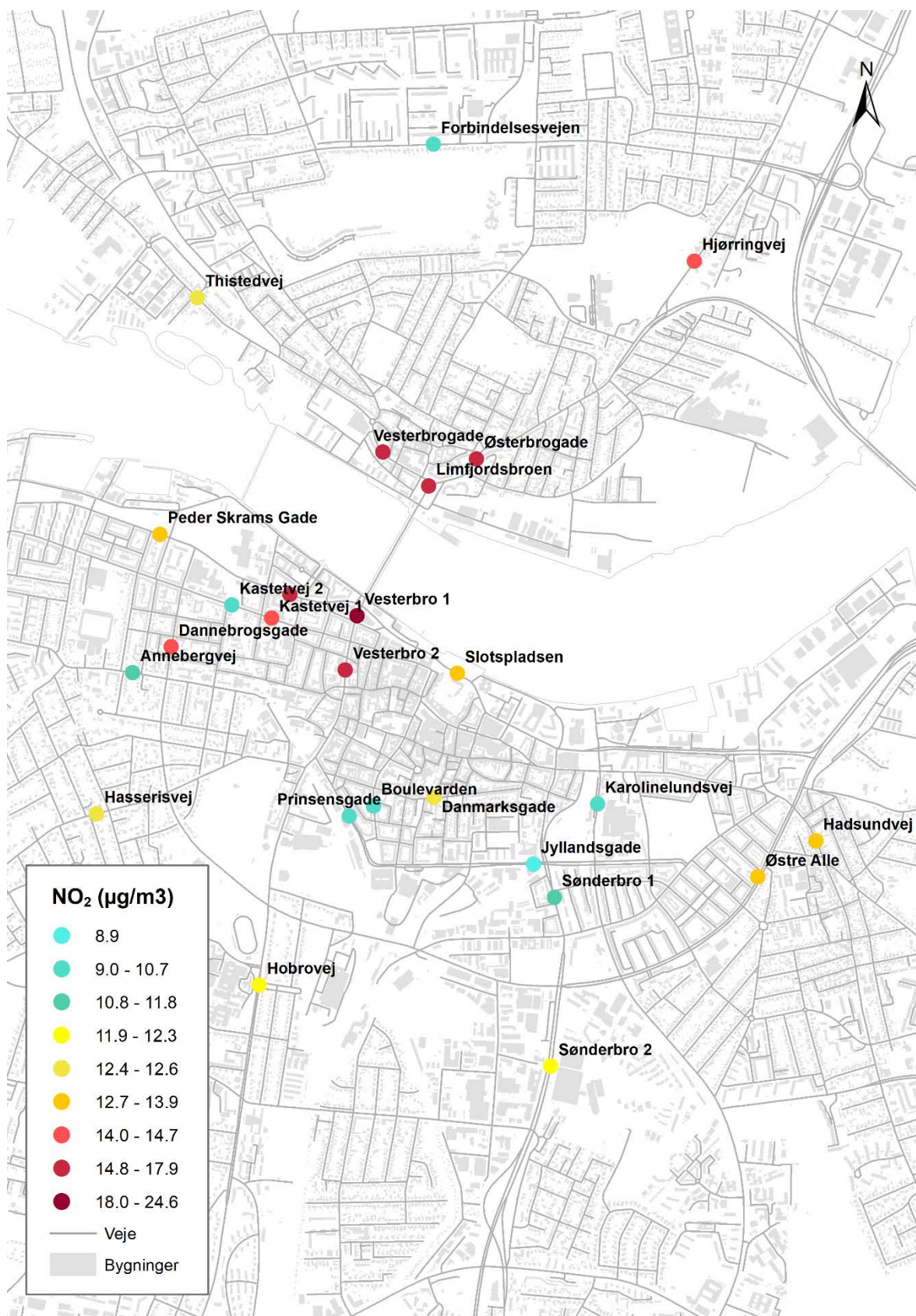
Årsmiddelkoncentrationerne for kvælstofdioxid for de 26 udvalgte gadestrækninger ligger i intervallet fra 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ og op til 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figur 2.7). Gennemsnitligt ligger årsmiddelkoncentrationerne for de 26 udvalgte gadestrækninger i 2022 omkring 4,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ lavere end den gennemsnitlige årsmiddelkoncentration for 2021, som også skyldes lavere beregnede koncentrationer i bybaggrund og regional baggrund. Målingerne viser tilsvarende lidt lavere koncentrationer i 2022 i forhold til 2021 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 målestation 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 2022 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 21 ud af de 26 gader i Aalborg. Der er først tale om en overskridelse ved værdier over 10,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, da retningslinjen er defineret som et heltal.



Figur 2.7. Årsmiddelkoncentrationer for kvælstofdioxid i 2022 for 26 udvalgte gadestrækninger 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 gadestrækning er for den side af gaden, der har den højeste årsmiddelkoncentration af de to sider. Vesterbro 2 er den gadestrækning, 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 gadestrækninger i Aalborg og årsmiddelmålinger for kvælstofdioxid i 2022. 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 årsmiddelmåling 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 web-GIS-tjeneste, se <https://augis.au.dk/portal/apps/mapviewer/index.html?web-map=53e265029e394f08ac70c3a92ba0a188>

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.

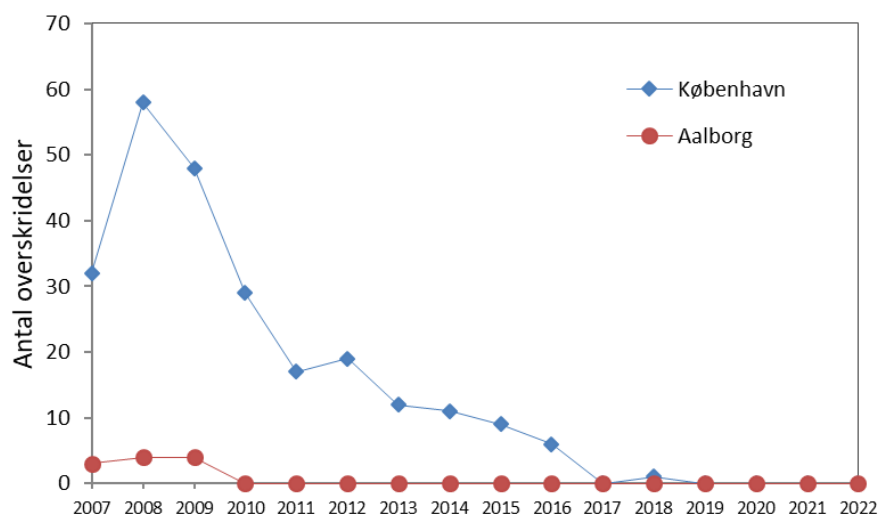
Grænseværdien på $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for årsmiddelkoncentrationen af kvælstofdioxid skulle være opfyldt i 2010 (EU, 2008). Luftkvalitetsdirektivet indeholder endvidere en mekanisme, som skulle anspore medlemsstaterne til løbende at nærme sig grænseværdien i perioden fra 1999 frem til 2010. I 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.

I 2022 er der ingen modelberegneede overskridelser af grænseværdien for årsmiddelkoncentrationen for de 98 udvalgte gadestrækninger i København (Figur 2.5). Resultaterne fra modelberegningerne er i overensstemmelse med måleresultaterne, hvor der heller ikke blev observeret overskridelser i 2022. Der har ikke været overskridelser af grænseværdien i Aalborg siden 2010.



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 på 21 ud af de 26 gader i 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 µg/m³ i løbet af kalenderåret (EU, 2008).

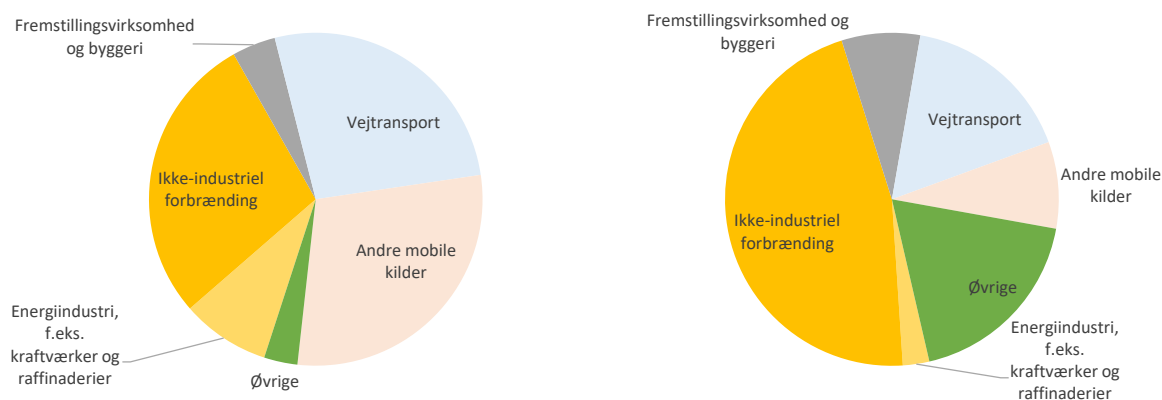
Status og udvikling i luftkoncentrationerne af carbonmonoxid blev i 2022 målt på fire gademålestationer, en bybaggrundsmålestation og en landbaggrundsmålestation.

3.1 Udledninger

I 2021 kom de største bidrag til udledningerne af carbonmonoxid omtrent ligeligt fra ikke-industriell forbrænding, vej- og andre mobile kilder (Figur 3.1 og Tabel 3.1; Nielsen et al., 2023). Til sammen udgør disse tre kilder omkring 84% 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., 2023). Det største fald er sket for vejtransport (omkring 89%), 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-industriell forbrænding den største kilde i EU.

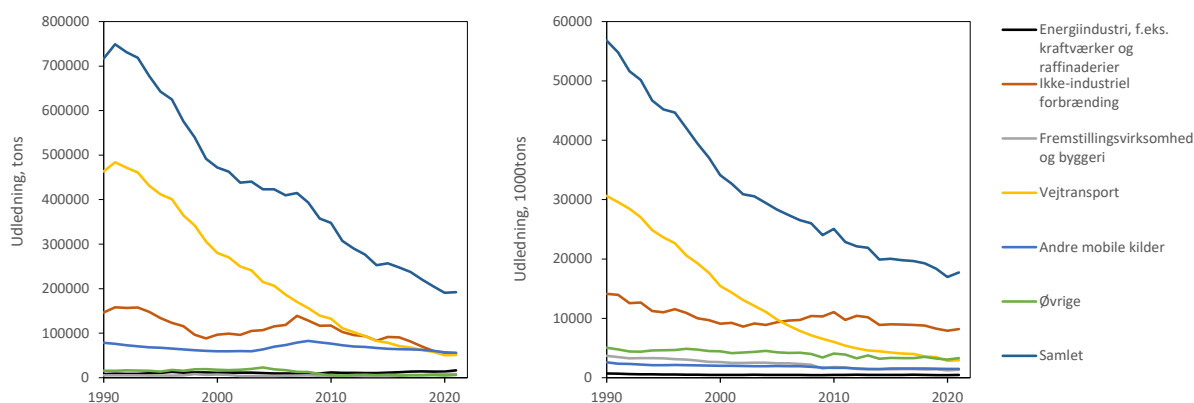


Figur 3.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af carbonmonoxid i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2021. Figurene viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2023, CEIP, 2023).

Tabel 3.1. Kilderne til de menneskabte udledninger af carbonmonoxid i Danmark i 2021 (Nielsen et al., 2023). 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	2021
		Tons	%
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	16534	9
Ikke-industriel forbrænding	2	54223	28
<i>Handel og service</i>	201	988	1
<i>Husholdninger</i>	202	48604	25
<i>Land, skovbrug og akvakultur</i>	203	4631	2
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	8116	4
Industrielle processer	4	12	0
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	5	0	0
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	3659	2
Vejtransport	7	51161	27
<i>Udstødning</i>	701-706	51161	27
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	0	0
Andre mobile kilder*	8	55923	29
Affald	9	1409	1
Landbrug	3b,d,f-i	1150	1
Samlet		192188	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 carbonmonoxid i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) siden 1990 (Nielsen et al., 2023; CEIP, 2023).

3.2 Status for luftkvalitet

CO blev i 2022 målt ved gademålestationerne i København, Odense, Aalborg og Aarhus samt ved bybaggrundmålestationen i København og landbaggrundmålestationen ved Risø. Tabel 3.2 angiver årsmiddelværdien og resultater for den maksimale 8-timersmiddelværdi. EU's grænseværdi angiver, at den maksimale 8-timersmiddelværdi ikke må overstige $10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i løbet af kalenderåret og er således fastlagt for at beskytte befolkningen mod korttids eksponering for CO (EU, 2008). Den højest målte maksimale 8-timersmiddelværdi er omkring 10% af grænseværdien og ved alle målestationerne ligger de målte koncentrationer således langt under grænseværdien.

Table 3.2. Årsmiddelværdi for CO i 2022 samt den maksimale 8-timersmiddelværdi. Desuden angives grænseværdien for CO (EU, 2008). EU kræver en dækningsgrad på mindst 85% af kalenderåret. På basis heraf vurderes datadækningen at være tilstrækkelig på alle målestationer.

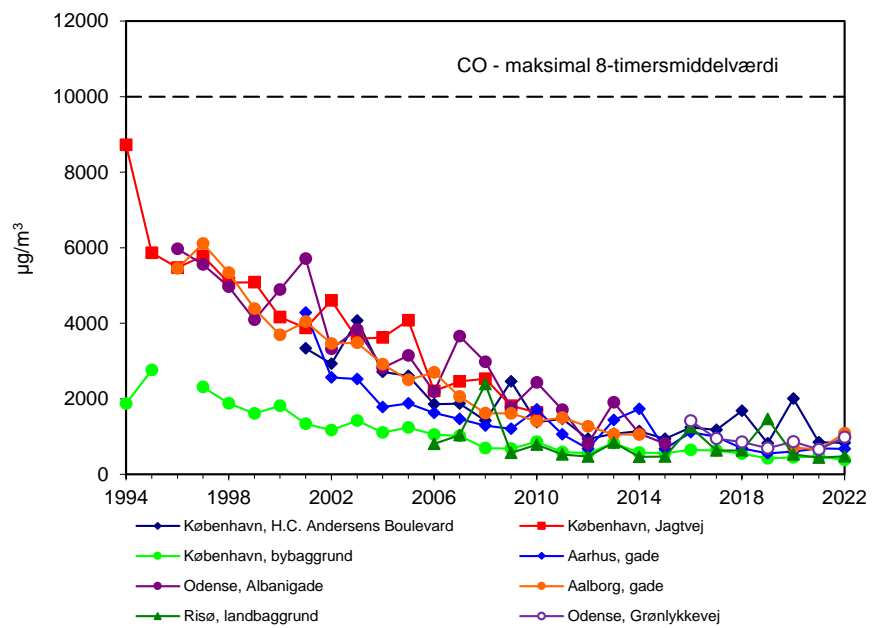
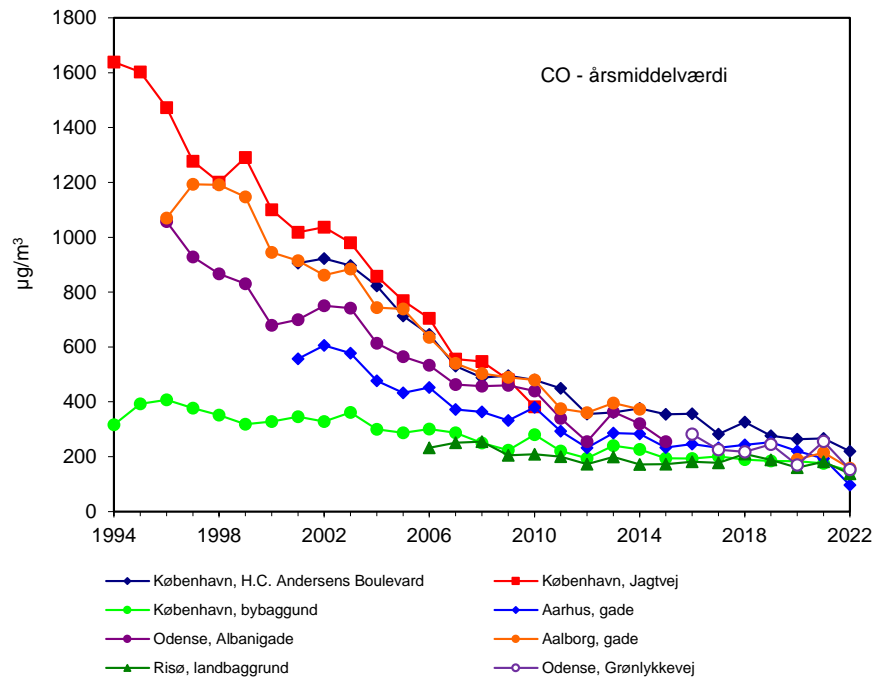
	Datadækning %	Årsmiddel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Maksimal 8-timers-middelværdi $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Grænseværdi			10.000
<i>Gade</i>			
København, H.C. Andersens Boulevard	92	219	829
Odense, Grønløkkevej	94	153	978
Aarhus, Banegaardsgade	91	96	672
Aalborg, Vesterbro	87	158	1083
<i>Bybaggrund</i>			
København	95	148	376
<i>Landbaggrund</i>			
Risø	95	137	475

Koncentrationsniveauet er nogenlunde på samme niveau ved gademålestationerne i København, Odense og Aarhus. Ved gademålestationerne stammer mindst 70% af carbonoxid fra den regionale baggrund i 2022. Resten stammer fra udledningerne fra trafikken i den pågældende gade (gadebidraget).

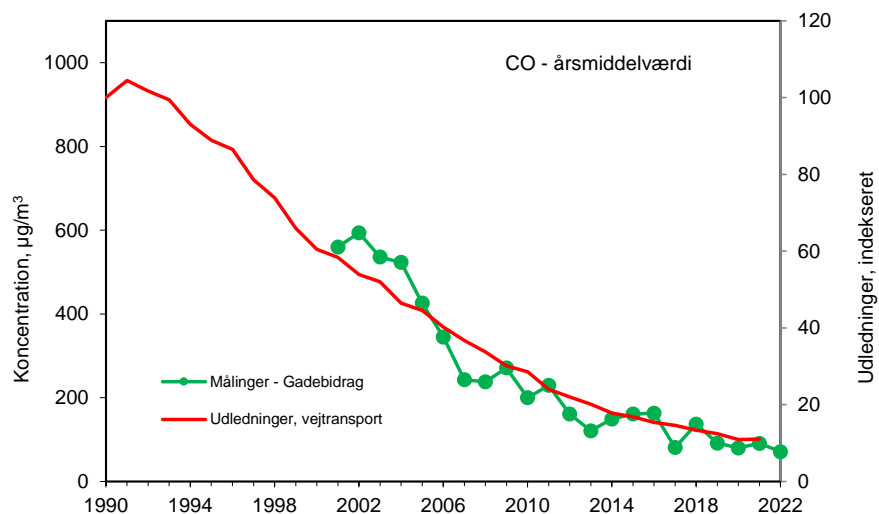
3.3 Udviklingstendens

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 2022 lå de målte koncentrationer ved gademålestationerne på omkring 15% af niveauerne i midten af 1990'erne.

Det store fald på de danske gademålestationer skyldes hovedsageligt det store fald i udledningerne 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 (øverst) og den maksimale 8-timersmiddelværdi (nederst) for CO. Den stiplede linje i den nederste 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., 2023). Gadebidraget beregnes som forskel mellem de målte koncentrationer på gademålestation (H.C. Andersens Boulevard) fratrukket 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 2022 kun målt med gasmonitører med høj tidsopløsning (½-timesmiddelværdier) ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard i København og på gademålestationen i Aalborg.

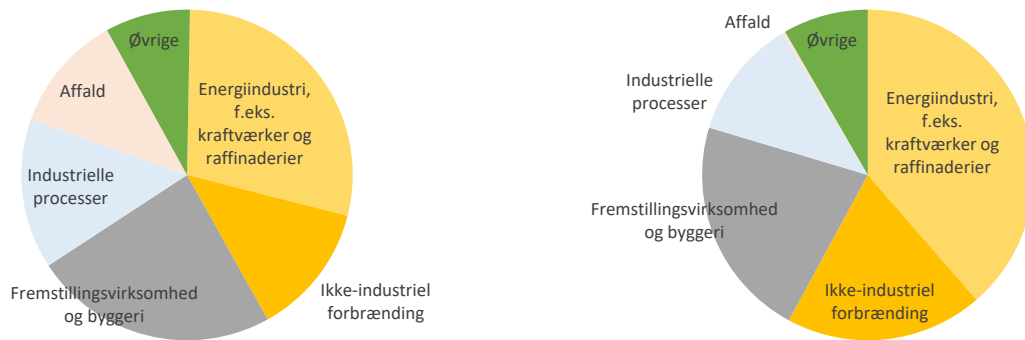
I forbindelse med landbaggrundsmålestationerne foretages også målinger af svovldioxid på døgnmiddelbasis med de såkaldte filterpack-opsamlere (se Elermann et al., 2021 for yderligere detaljer).

4.1 Udledninger

Udledningerne af svovldioxid fra danske kilder har gennem de seneste mange årtier været helt domineret af udledningerne fra afbrænding af navnlig kul og olie. Afsvovlingsanlæg på forbrændingsanlæggene og brug af svovlfattigt brændstof har givet en meget stor reduktion af udledningerne, men selv i 2021 kommer den største del af udledningerne af svovldioxid fra afbrænding af kul, olie og andre brændsler. Forbrænding i forbindelse med energiproduktion, fremstillingsvirksomhed og byggeri samt industrielle processer er de tre vigtigste kildetyper, mens vejtransport kun spiller en lille rolle i dag (Figur 4.1 og Tabel 2.1; Nielsen et al., 2023).

De samlede udledninger af svovldioxid er faldet med omkring 95% siden begyndelsen af 1990'erne (Figur 4.2; Nielsen et al., 2023). 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).

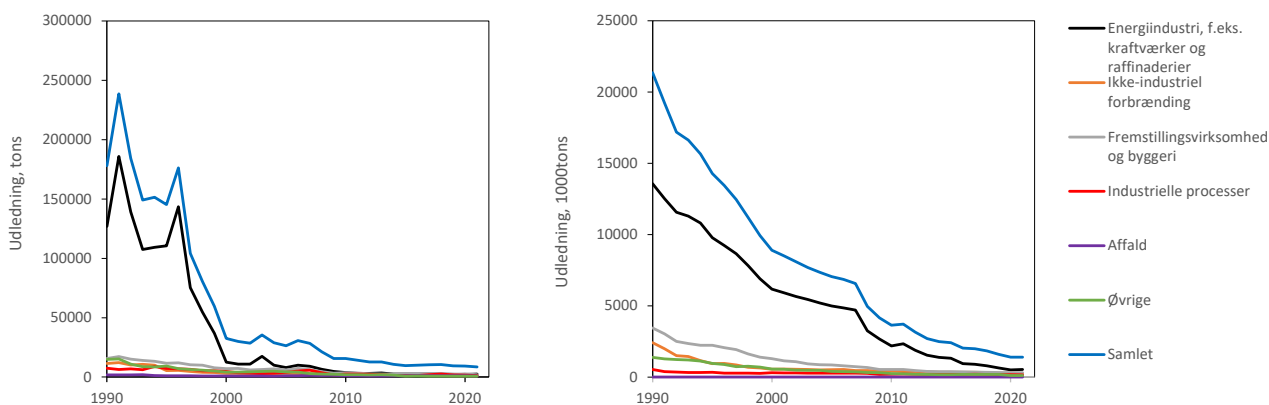


Figur 4.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af svovldioxid i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2021. Figureerne viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2023, CEIP, 2023). For SO₂ er der i forhold til de foregående år blevet ændret i kildeopgørelserne, således hele emissionen fra olie (der før udgjorde mere end 99,9% af det samlede bidrag til *Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler*, SNAP 05) fra 2021-opgørelsen, er blevet allokeret til *Industrielle processer* (SNAP 04), hvorfor det samlede bidrag til SNAP 05 i 2021 bliver ubetydeligt.

Tabel 4.1. Kilderne til de menneskeskabte udledninger af svovldioxid i Danmark i 2021 (Nielsen et al., 2023). 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). For SO₂ er der i forhold til de foregående år blevet ændret i kildeopgørelserne, således hele emissionen fra olie (der før udgjorde mere end 99,9% af det samlede bidrag til *Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler*, SNAP 05) fra 2021-opgørelsen, er blevet allokeret til *Industrielle processer* (SNAP 04), hvorfor det samlede bidrag til SNAP 05 i 2021 bliver ubetydeligt.

Kategori	SNAP-kode	Udledninger	
		Tons	2021 %
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	2463	29
Ikke-industriel forbrænding	2	1110	13
<i>Handel og service</i>	201	53	1
<i>Husholdninger</i>	202	737	9
<i>Land, skovbrug og akvakultur</i>	203	320	4
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	2048	24
Industrielle processer	4	1262	15
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	5	0	0
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	52	1
Vejtransport	7	71	1
<i>Udstødning</i>	701-706	71	1
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	0	0
Andre mobile kilder *	8	581	7
Affald	9	987	12
Landbrug	3b,d,f-i	9	0
Samlet		8583	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., 2023; CEIP, 2023). For SO₂ er der i forhold til de foregående år blevet ændret i kildeopgørelserne, således hele emissionen fra olie (der før udgjorde mere end 99,9% af det samlede bidrag til *Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler*, SNAP 05) fra 2021-opgørelsen, er blevet allokateret til *Industrielle processer* (SNAP 04), hvorfor det samlede bidrag til SNAP 05 i 2021 bliver ubetydeligt. Denne ændring er blevet ført tilbage til 1990.

4.2 Status for luftkvalitet

Tabel 4.2 angiver de vigtigste resultater for 2022 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 timemiddelværdi og døgnmiddelværdien ligger langt under de fastsatte grænser. Ved landbaggrundsmålestationerne ligger årsmiddelkoncentrationerne på omkring 10-30% af niveauerne på gademålestationerne på H.C. Andersens Boulevard i København og Vesterbro i Aalborg.

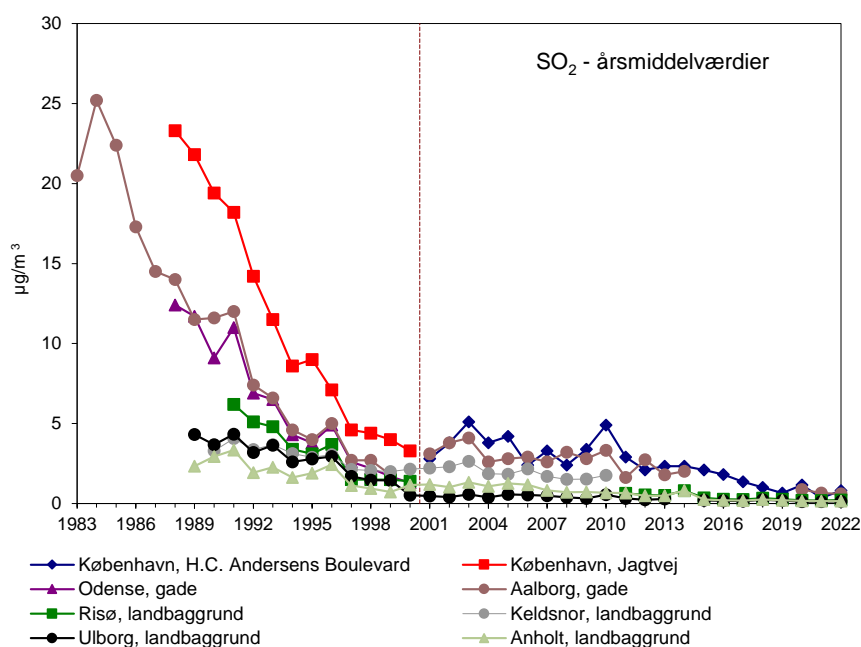
Tabel 4.2. Årsmiddelværdi for svovldioxid i 2022 og en række andre parametre til vurdering af overholdelse af de i EU fastlagte målsætninger for svovldioxid (EU, 2008). For svovldioxid er der to grænseværdier. Den ene er baseret på timemiddelværdien, hvor timemiddelværdien højest må overskride 350 µg/m³ 24 gange i et kalenderår. Den anden er baseret på døgnmiddelværdien, hvor døgnmiddelværdien højest må overskride 125 µg/m³ tre gange i et kalenderår. Målingerne ved gademålestationerne er baseret på timemiddelkoncentrationer med automatiske gasmonitører, mens målingerne ved landbaggrundsmålestationerne er baseret på døgnmiddelmålinger ved hjælp af filterpack-opsamlere (og derfor er der ikke data fra landbaggrundsmålestationerne vedrørende timemiddelværdier). EU kræver en dækningsgrad på mindst 85% af kalenderåret. På basis heraf vurderes datadækningen at være tilstrækkelig på alle målestationer.

	Datadækning %	Årsmiddelværdi µg/m ³	Højeste timemiddelværdi µg/m ³	Antal timer med timemiddelværdi over 350 µg/m ³ Antal timer	Højeste døgnmiddelværdi µg/m ³	Antal dage med døgnmiddelværdi over 125 µg/m ³ Antal dage
Grænseværdi			350	24	125	3
<i>Gade</i>						
København, H.C. Andersens Boulevard	93	0,8	9,4	0	1,5	0
Aalborg, Vesterbro	93	0,6	13	0	1,3	0
<i>Landbaggrund</i>						
Risø	98	0,2			2,0	0
Anholt	99	0,2			1,2	0
Tange	98	0,1			1,3	0
Ulborg	96	0,1			1,3	0

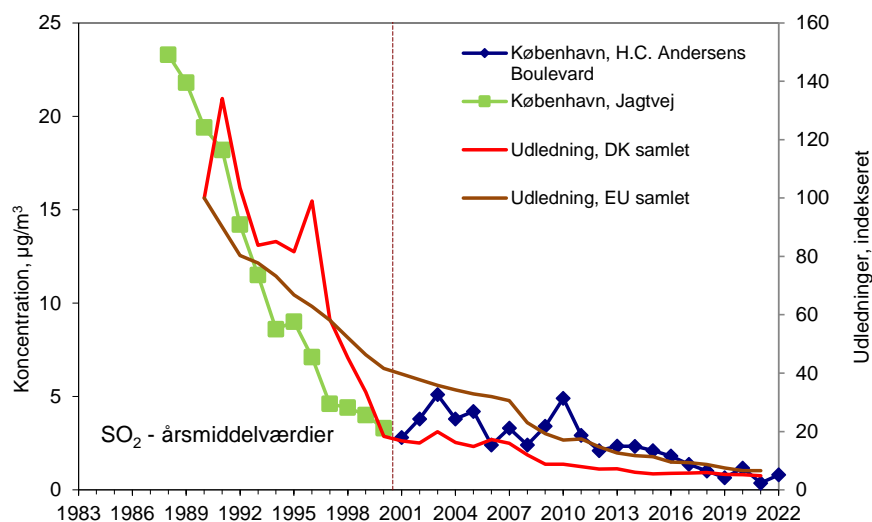
4.3 Udviklingstendens

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 gademålestationerne under 5% af de målte luftkoncentrationer i 1980'erne. For landbaggrund ses også et markant fald, hvor koncentrationerne i 2022 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 strek) skifter målemetoden fra filterpack-opsamlere kombineret med kemisk analyse af opsamlede prøver til den nuværende metode baseret på gasmonitører. Gasmonitørerne 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 gasmonitørernes detektionsgrænse. Målingerne på landbaggrundsmålestationerne 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., 2023; 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 koncentrationer (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 ozon dannelse: 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 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 langtidseksposering 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 luftkvalitets direktiv 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

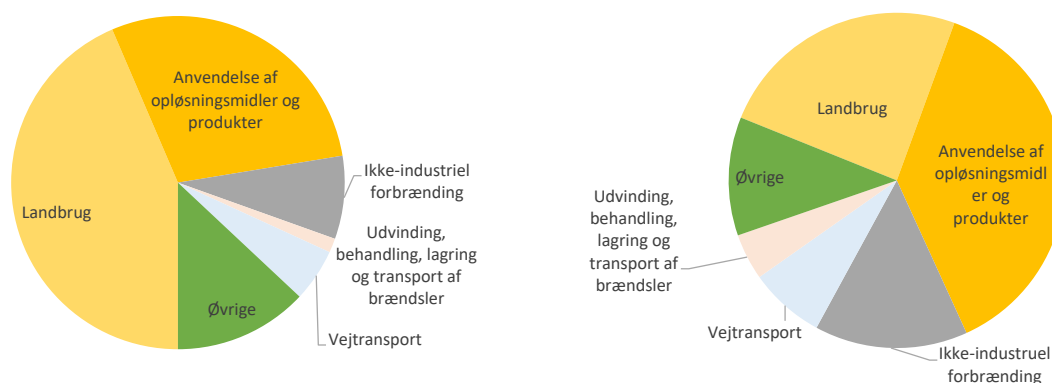
Opgørelser over udledningerne af flygtige organiske forbindelser omfatter ikke metan, selv om metan også hører under gruppen af flygtige organiske forbindelser, hvilket er fordi metan adskiller sig meget fra den øvrige gruppe af flygtige organiske forbindelser.

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.,

2023). De flygtige organiske forbindelser udledes fra en lang række menneskeskabte aktiviteter, hvor navnlig landbrug og anvendelse af opløsningsmidler spiller en stor rolle.. 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 50% siden begyndelsen af 1990'erne (Figur 5.2; Nielsen et al., 2023). Langt størstedelen af faldet i udledninger skyldes reduktionen i udledningerne fra 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 faldt lidt langsommere i Danmark end i EU-27 (Figur 5.2).

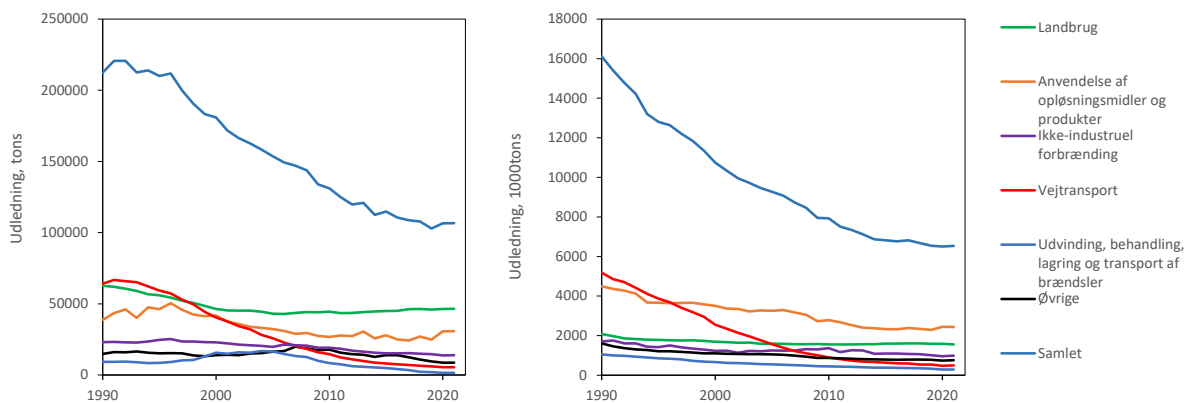


Figur 5.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af flygtige organiske forbindelser i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2021. Figurene viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2023, CEIP, 2023). For NMVOC er der sket en ændring i metoden for kildeopgørelsen, således fordelingen mellem kategorien *Industrielle processer* (SNAP 04) og kategorien *Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler* (SNAP 05), er blevet anderledes i 2021 i forhold til opgørelsen de foregående år.

Tabel 5.1. Kilderne til de menneskabte udledninger af flygtige organiske forbindelser i Danmark i 2021 (Nielsen et al., 2023). Kilderne er opgjort i 10 hovedkategorier med en yderligere underopdeling for "Ikke-industriell forbrænding" og "Vejtransport". Opdelingen er baseret på SNAP-koder (Selected Nomenclature for Air Pollution). For NMVOC er der sket en ændring i metoden for kildeopgørelsen, således fordelingen mellem kategorien *Industrielle processer* (SNAP 04) og kategorien *Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler* (SNAP 05), er blevet anderledes i 2021 i forhold til opgørelsen de foregående år.

Kategori	SNAP-kode	Udledninger	
		2021	
		Tons	%
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	1231	1
Ikke-industriell forbrænding	2	8597	8
<i>Handel og service</i>	201	137	0
<i>Husholdninger</i>	202	7079	7
<i>Land, skovbrug og akvakultur</i>	203	1380	1
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	618	1
Industrielle processer	4	7501	7
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	5	1467	1
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	30767	29
Vejtransport	7	5482	5
<i>Udstødning</i>	701-706	5482	5
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	0	0
Andre mobile kilder *	8	4003	4
Affald	9	517	0
Landbrug	3b,d,f-i	46439	44
Samlet		106620	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., 2023; CEIP, 2023). For NMVOC er der sket en ændring i metoden for kildeopgørelsen, således fordelingen mellem kategorien *Industrielle processer* (SNAP 04) og kategorien *Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler* (SNAP 05), er blevet anderledes i 2021 i forhold til opgørelsen de foregående år. Denne ændring er blevet ført tilbage til 1990.

5.2 Status for luftkvalitet

Tabel 5.2 angiver status for årsmiddelværdierne af benzen, toluen, ethylbenzen og xylenerne i 2022. 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 2022 samt grænseværdi for benzen (EU, 2008). Der mangler data fra Jagtvej i 2022, da målestationen var midlertidigt lukket i store dele af året grunder omfattende vejarbejde. EU kræver en dækningsgrad på mindst 85% af kalenderåret. På basis heraf vurderes datadækningen at være tilstrækkelig på alle målestationer bortset fra Jagtvej.

	Dækningsgrad %	Benzen µg/m ³	Toluen µg/m ³	Ethylbenzen µg/m ³	m/p-Xylen µg/m ³	o-Xylen µg/m ³
Grænseværdi		5				
<i>Gade</i>						
København, H.C. Andersens Boulevard	100	0,48	1,0	0,18	0,60	0,21
København, Jagtvej	13	0,51*	0,69*	0,14*	0,45*	0,16*
<i>Bybaggrund</i>						
København, H.C. Ørsted Institutet	93	0,29	0,76	0,14	0,31	0,23

*Kun dækning for omkring 13% af året grundet midlertidig standsning af målestationen som følge af omfattende vejarbejde.

Benzen måles ikke direkte i Aarhus, Aalborg og Odense, men i stedet anvendes objektiv estimering til at vurdere årsmiddelkoncentrationerne på gadeniveau i de tre byer. 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. Denne metode medfører imidlertid, at benzenkoncentrationen på gadeniveau i Aarhus estimeres til at blive lavere end målt ved bybaggrundsmålestationen i København, hvilket er urealistisk. Derfor er det valgt at basere den objektive estimering af benzen for Aarhus på en antagelse om, at benzenkoncentrationen i Aarhus vil være på niveau med eller lidt lavere end den målte koncentration for H.C. Andersens Boulevard i København. Det skal i løbet af 2024 vurderes, om der er behov for udarbejdelse af en ny metode til objektiv estimering af benzen.

For 2022 bliver årsmiddelkoncentrationerne dermed estimeret til at ligge omkring 0,3-0,5 µg/m³. Disse objektive estimater 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 2022 målt ved bybaggrundsmålestationen på H.C. Ørsted Institutet. Til sammenligning angives også årsmiddelkoncentrationerne for 2010 samt faldet i årsmiddelkoncentrationerne fra 2010 til 2022. Dækningsgrad er på 93% for alle koncentrationer fra 2021 og for 2010 var dækningsgrad over 85%. EU kræver en dækningsgrad på mindst 85% af kalenderåret, så derfor vurderes datadækningen at være tilstrækkelig på alle målestationer.

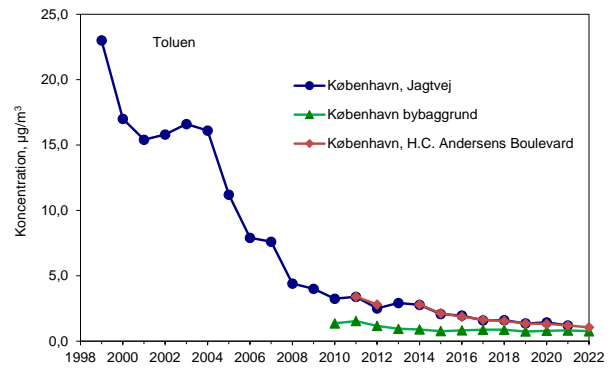
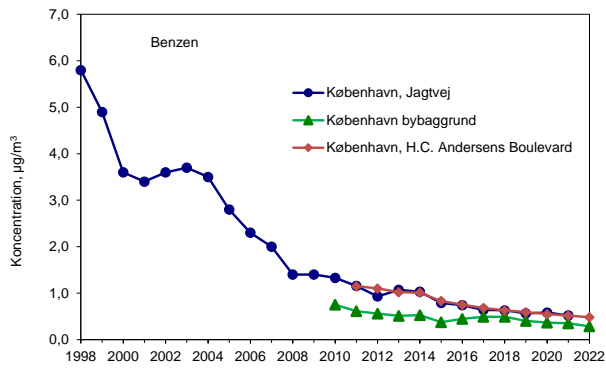
Kemisk forbindelse	Årsmiddelkoncentration, µg/m ³		Ændring siden 2010
	2010	2022	%
1-Penten	0,04	0,03	-10
n-Pentan	0,53	0,60	13
trans-2-Penten	0,02	0,02	-18
Isopren	0,03	0,06	75
2-Methylpentan	0,31	0,42	35
n-Hexan	0,19	0,08	-58
Benzen	0,75	0,29	-62
n-Heptan	0,28	0,06	-79
2,2,4-trimethylpentan/ isooktan	0,10	0,18	74
Toluen	1,36	0,76	-44
n-Oktan	0,08	0,04	-47
Ethylbenzen	0,28	0,14	-51
m- og p-Xylen	0,78	0,31	-61
o-Xylen	0,41	0,23	-44
1,3,5-trimethylbenzen	0,10	0,03	-76
1,2,4-trimethylbenzen	0,34	0,11	-67
1,2,3-trimethylbenzen	0,09	0,03	-72
Samlet	5,68	3,36	-41

5.3 Udviklingstendens

Figur 5.3 viser udviklingstendensen for årsmiddelværdierne af benzen og toluen ved gademålestationerne på Jagtvej og bybaggrundsmålestationen i København. Toluen er skadeligt og findes i relativt høje luftkoncentrationer. Da målestationen på Jagtvej grundet omfattende vejarbejde var midlertidigt lukket i store dele af 2022, så er der ingen data for Jagtvej i 2022. Derfor viser Figur 5.3 også udviklingstendensen målt siden 2011 på gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard. Både niveauer og udviklingstendens er meget ens på de to målestationer.

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 gademålestationerne på Jagtvej og H.C. Andersens Boulevard samt bybaggrundsmålestationen i København (H.C. Ørsted Institutet). Der mangler data fra Jagtvej i 2022, da målestationen var midlertidigt lukket i store dele af året grundet omfattende vejarbejde.

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 korttids eksponering 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 2022 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 årsmiddelkoncentrationer, hvor koncentrationen ved gademålestationen ligger væsentligt lavere end i bybaggrund og landbaggrund, mens der kun er meget lille forskel mellem resultaterne fra baggrundsmålestationerne.

EU har fastlagt en målværdi for O₃ for korttids eksponeringen af O₃. 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 (EU, 2008). Som angivet i tabel 6.1, ligger antallet af dage med overskridelse af 120 µg/m³ på 9 gange eller derunder i 2022. I 2020 og 2021 lå antallet af dage med overskridelse ligeledes under 25 (Ellermann et al., 2022,

2023), og der er derfor ingen overskridelse af målværdien for perioden fra 2020-2022.

EU har desuden fastlagt en langsigtet målsætning på 120 µg/m³ som maksimum 8-timersmiddelværdi, men tidspunktet for ikrafttrædelse af denne målsætning er ikke fastlagt (EU, 2008). I 2022 blev den langsigtede målsætning overskredet på alle målestationer (tabel 6.1).

Endelig har EU også en informationstærskel for timemiddelværdien af O₃ på 180 µg/m³ (EU, 2008). Når denne informationstærskel overskrides, skal befolkningen informeres om, at ozonniveauerne er høje, og at de høje koncentrationer vil kunne give anledning til gener. Denne informationstærskel blev overskredet en enkelt gang i 2022 ved landbaggrundsmålestationen Ulborg (tabel 6.1).

Tabel 6.1. Årsmiddelværdier for O₃ i 2022 og en række andre parametre til vurdering af overholdelse af de i EU fastlagte målsætninger for O₃ (EU, 2008). For O₃ 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. EU kræver en dækningsgrad på mindst 85% af kalenderåret. På basis heraf vurderes datadækningen at være tilstrækkelig på alle målestationer, bortset fra Odense hvor det er lidt forhøjet usikkerhed som følge af den lidt for lave dækningsgrad grundet tekniske fejl i forbindelse med målingerne i dele af 2023.

	Datadækning %	Årsmiddel- værdi µg/m ³	Antal dage med maksimal 8-timersmiddel- værdi over 120 µg/m ³	Maksimum 8-timersmiddel- værdi µg/m ³	Højeste time- middelværdi µg/m ³
Målværdi			25*		
Langsigtet målsætning				120	
Informationstærskel					180
<i>Gade</i>					
København, H.C. Andersens Boulevard	91	52	1	125	132
<i>Bybaggrund</i>					
København	91	63	11	136	147
Odense	78	65	7	167	178
Aarhus	90	59	4	162	168
Aalborg	90	62	2	157	174
<i>Landbaggrund</i>					
Keldsnor	87	63	9	147	161
Risø	91	64	8	134	162
Ulborg	91	63	3	161	191**

* Målværdi gælder som gennemsnit for de seneste tre kalenderår

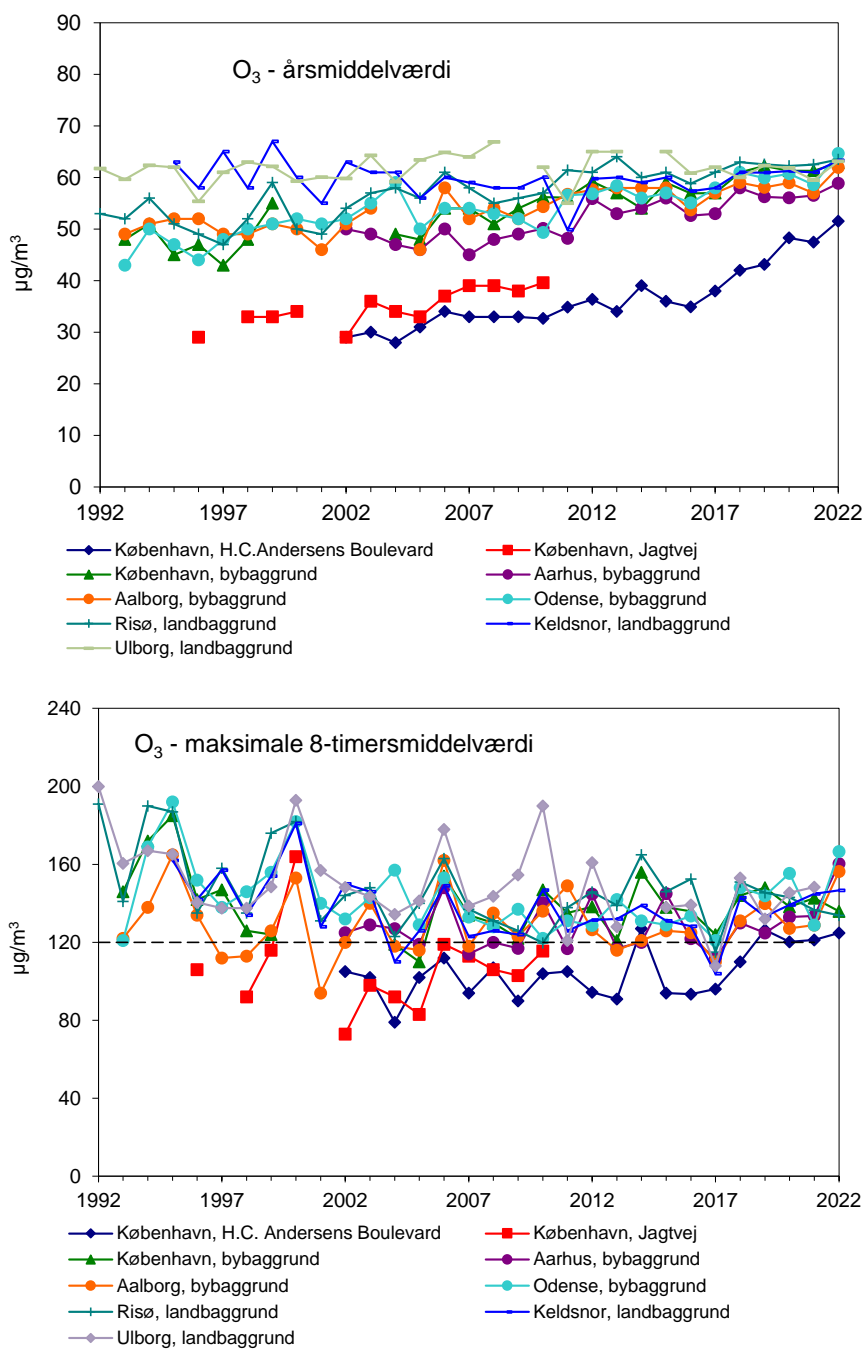
** Kun overskridelse af 180 µg/m³ en enkelt dag.

6.2 Udviklingstendens

Figur 6.1 viser udviklingstendens for årsmiddelværdien og den maksimale 8-timersmiddelværdi for O₃. For landbaggrundsstationerne ses uændrede årsmiddelværdier gennem hele måleperioden, omend der er en svag stigning ved Risø i den første halvdel af måleperioden. Til gengæld ses en svag stigning ved bybaggrundsmålestationerne og en tydelig stigning ved gademålestationerne. Dette billede afspejler, at der navnlig i byerne er sket et stort fald i udledningerne af NO_x. Det store fald i NO_x har reduceret nedbrydningen af O₃ på lokalt niveau i byerne, hvilket resulterer i en stigning i ozonkoncentra-

tionerne. Denne stigning ses navnlig ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard, som er påvirket af udledningerne fra den stærkt trafikerede gade, og dermed ses indvirkningen af den faldene udledning af NO_x fra vejtrafikken mest tydeligt her.

For de maksimale 8-timersmiddelværdier er der et fald i 1990'erne og begyndelsen af 2000'erne ved baggrundmålestationerne. Siden midten af 2000'erne har værdierne ligget på omtrent samme niveau. Siden 1990'erne er der dermed sket et fald i udsættelsen for episoder med høje koncentrationsniveauer af O₃.



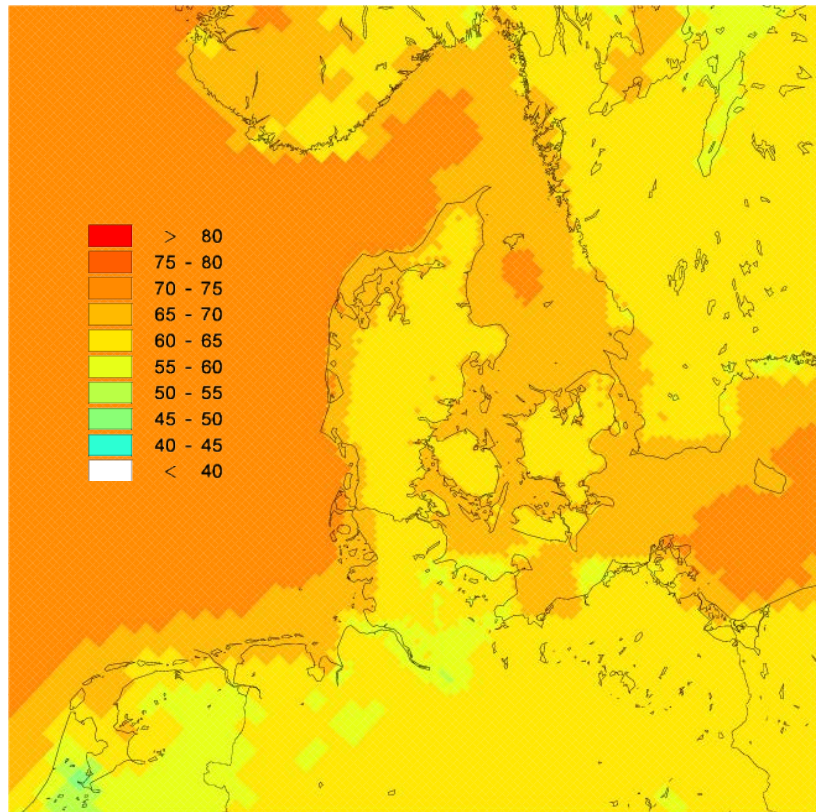
Figur 6.1. Årsmiddelværdier (øverst) og den maksimale 8-timersmiddelværdi (nederst) for O₃. Den stiplede linje i den nederste figur angiver EU's langsigtede målsætning, som endnu ikke er trådt i kraft (EU, 2008).

6.3 Modelberegninger

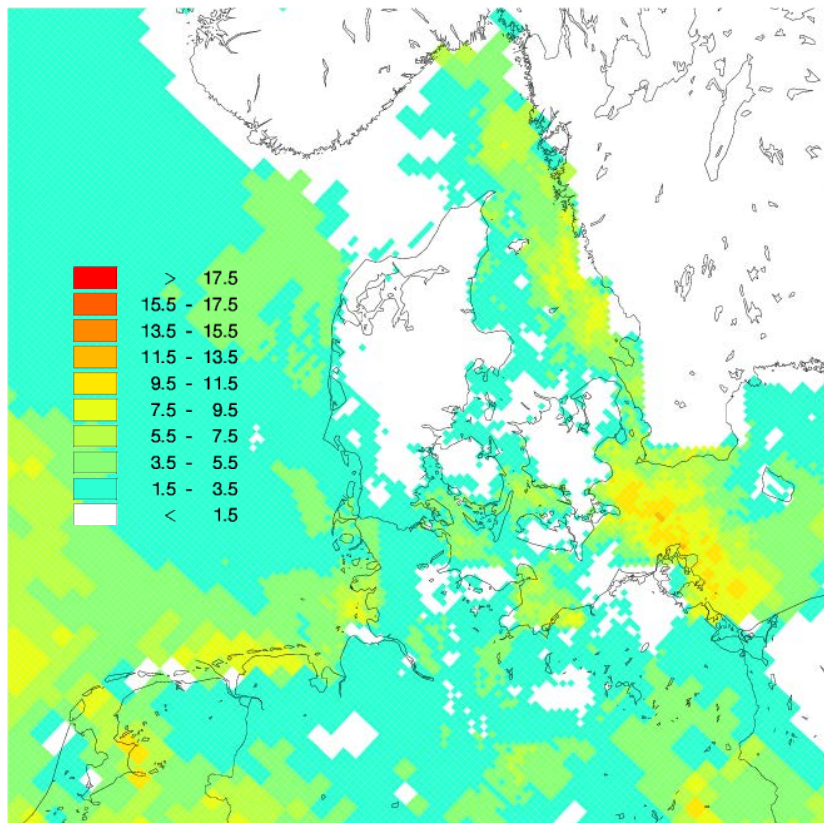
Modelberegninger med regional skala-modellen DEHM viser, at den geografiske spredning af ozon er lille, og at årsmiddelværdien ligger på omkring 60-65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i langt hovedparten af landet (Figur 6.2). Dette er fint i overensstemmelse med resultaterne fra målingerne (Tabel 6.1). Årsmiddelkoncentrationen 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 2022. Der er ingen områder, hvor EU's grænse på 25 dage er overskredet.

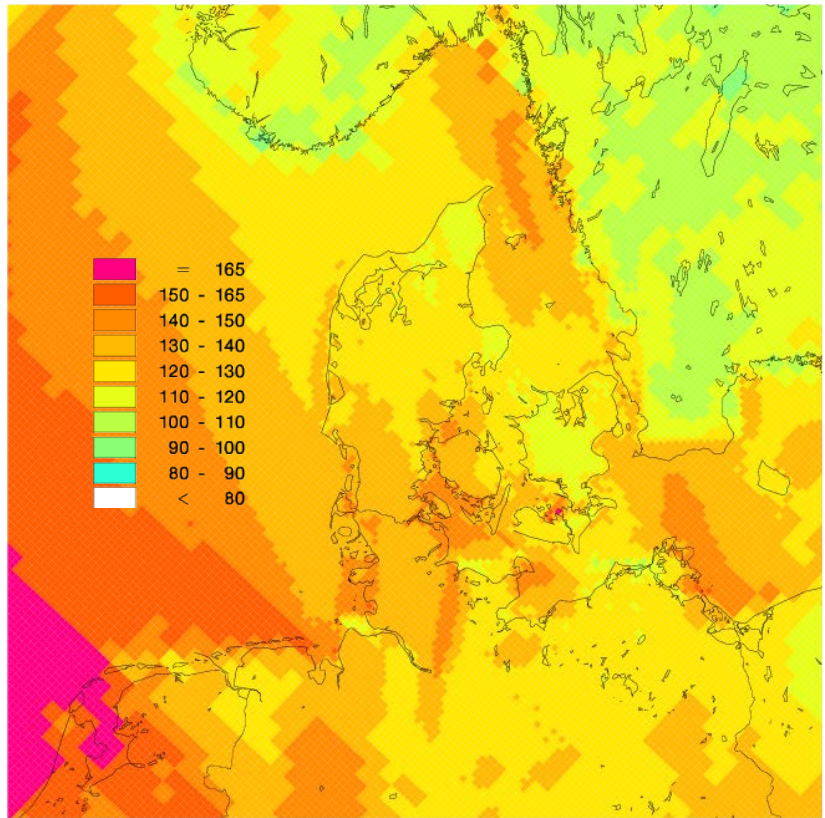
EU's langsigtede målsætning angiver, at den maksimale 8-timersmiddelværdi ikke må overskride 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i løbet af kalenderåret (EU, 2008). Figur 6.4 viser den geografisk variation for den maksimale 8-timersmiddelværdi. Her ses, at EU's langsigtede målsætning er overskredet i den største del af landet, hvilket er i relativt god overensstemmelse med resultaterne fra målingerne om end resultaterne fra modelberegningerne generelt set ligger noget under måleresultaterne (Tabel 6.1). Kun i dele af det nordøstlige Jylland og sydlige Sjælland 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 2022 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 2022 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 2022 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 skønmæssigt 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 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for et kalenderår.

Overvågningsprogrammet omfatter en relativt omfattende overvågning af $PM_{2,5}$ og PM_{10} . I 2022 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 (Keldsnor og Odense gade). Målestationen på Jagtvej var midlertidig lukket i perioden februar til december 2022 pga. omfattende vejarbejde.

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 om 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 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 54% af de udledte partikler med diameter mindre end $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}), mens de grovere partikler med diameter mellem 2,5 og $10 \mu\text{m}$ (PM_{Grove}) udgør omkring 46% (Tabel 7.1). PM_{Grove} er beregnet ud fra forskellen mellem PM_{10} og $PM_{2,5}$.

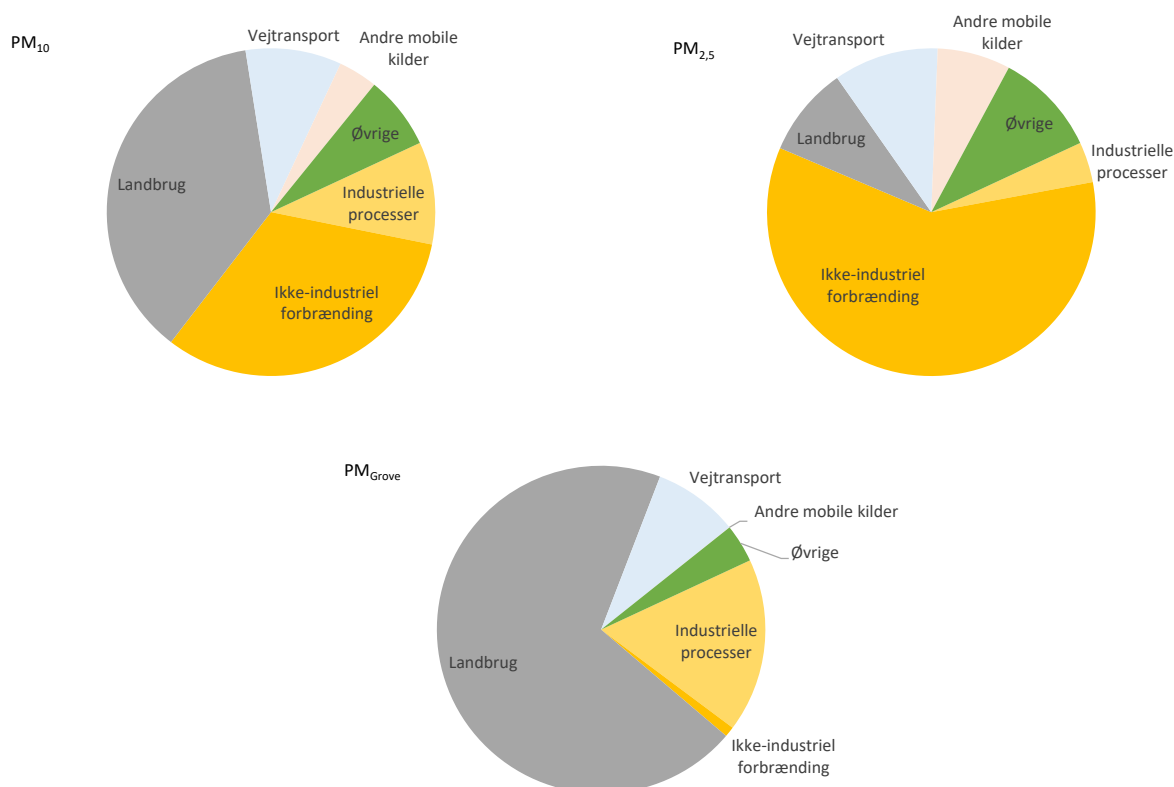
De fine partikler ($PM_{2,5}$) udledes i langt overvejende grad fra ikke-industriell forbrænding (hovedsageligt fra anvendelse af brænde til boligopvarmning, Figur 7.1; Nielsen et al., 2023). I 2021 var omkring 59% af udledningerne fra ikke-industriell forbrænding, og 51% kom alene fra boligopvarmning. Herefter kommer udledningerne fra vejtransport (10%) og andre mobile kilder (7%).

For de grove partikler (PM_{grove}) ses en meget anderledes kildesammensætning, hvor støv fra landbruget i 2021 stod for hovedparten (omkring 70%), mens industrielle processer var ansvarlig for omkring 17% og vejtransport for omkring 8% (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 PM₁₀ er faldet med omkring 36% 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%). 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.

Der laves ikke opgørelser over udledningerne af antallet af ultrafine partikler.



Figur 7.1. Kilderne til de direkte udledninger af partikelforurening i Danmark i 2021 (Nielsen et al., 2023). Øverst til venstre er PM₁₀, 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 PM₁₀ og PM_{2,5}. Figureerne 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 77%), 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., 2023).

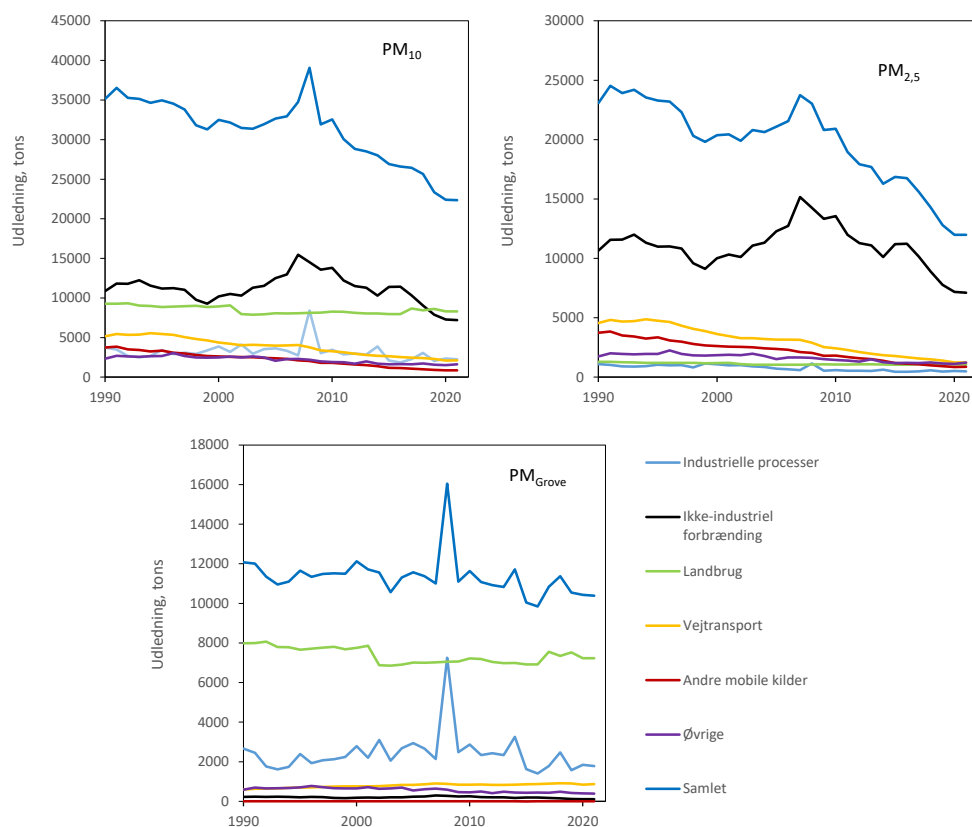
Det lille fald, som ses for udledningerne af de grove partikler (Figur 7.2), skyldes hovedsageligt et mindre fald i udledningerne fra landbrug, men også fald i de øvrige kilder. Til gengæld er det værd at bemærke, at der ses en stigning i udledningerne fra vejtransport. De grove partikler fra vejtransport 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 2021 (Nielsen et al., 2023). 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	622	3	533	4	89	1
Ikke-industriel forbrænding	2	7212	32	7107	59	105	1
<i>Handel og service</i>	201	94	0	91	1	3	0
<i>Husholdninger</i>	202	6177	28	6077	51	100	1
<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	203	941	4	938	8	2	0
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	177	1	116	1	61	1
Industrielle processer	4	2262	10	479	4	1783	17
Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	5	10	0	3	0	7	0
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	505	2	271	2	234	2
Vejtransport	7	2112	9	1238	10	874	8
<i>Udstødning</i>	701-706	225	1	225	2	0	0
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	1887	8	1013	8	874	8
Andre mobile kilder*	8	864	4	862	7	2	0
Affald	9	302	1	302	3	0	0
Landbrug	3b,d,f-i	8294	37	1065	9	7229	70
Samlet		22363	100	11976	100	10386	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., 2023). 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 $PM_{2,5}$.

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 45-60%. 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 2022 ved nogen af målestationerne.

Måleprogrammet omfatter endvidere målinger af partikelantal, som er en parameter, der angiver den luftbårne forureningen 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 årsrapporterne for 2017 til 2019 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 9.100 partikler per cm^3 på gademålestationen og ned til omkring 2.800 partikler per cm^3 på landbaggrundsmålestationen (tabel 7.3). For partikler i

området fra 41 til 478/550 nm varierer partikelantal fra 2.600 til 1.400 partikler per cm³. De helt små partikler mellem 10 og 41 nm udgør dermed antalsmæssigt størstedelen af partiklerne og ved gademålestationen udgør disse omkring 70% af partiklerne, hvilket skyldes partikeludledninger fra vejtrafikken. Der er ingen grænseværdier at sammenligne disse værdier med.

Tabel 7.2. Resultater for 2022 og grænseværdier for PM_{2,5} og PM₁₀. For PM_{2,5} og PM₁₀ angives årsmiddelværdien og de tilhørende grænseværdier fra EU's luftkvalitetsdirektiv (EU, 2008). For PM₁₀ er der endvidere en grænseværdi for korttidseksposering for PM₁₀, som angiver, at døgnmiddelværdien for PM₁₀ ikke må overskride 50 µg/m³ mere end 35 gange i et kalenderår (EU, 2008). Til sammenligning med korttidsgrænseværdien angives antallet af dage med overskridelse af 50 µg/m³. Der er ingen grænseværdi for partikelantal. Grænseværdier og måleresultater er angivet ved ambient tryk og temperatur. EU kræver en dækningsgrad på mindst 85% af kalenderåret. På basis heraf vurderes datadækningen at være tilstrækkelig på alle målestationer, bortset fra Jagtvej.

	PM _{2,5} Datadækning	PM _{2,5} Årsmiddel- Værdi	PM ₁₀ Datadækning	PM ₁₀ Årsmiddel- Værdi	PM ₁₀ Antal dage med døgnmiddelværdi over 50 µg/m ³
	%	µg/m ³	%	µg/m ³	Antal dage
Grænseværdi		25		40	35
<i>Gade</i>					
København, H.C. Andersens Boulevard	90	9,9	90	23	7
København, Jagtvej*	11*	10*	11*	18*	0*
Odense, Grønløkkevej			98	17	3
Aarhus, Banegaardsgade	99	9,1	97	17	3
Aalborg, Vesterbro**	81**	8,4**			
<i>Bybaggrund</i>					
København	86	8,0	86	14	0
Aarhus	96	7,7			
Aalborg	87	7,0			
<i>Forstad</i>					
Hvidovre	85	7,5			
<i>Landbaggrund</i>					
Keldsnor			99	14	2
Risø	88	7,4	90	13	0

* Datadækningen ved målestationen på Jagtvej er for PM_{2,5} og PM₁₀ på 11%. Den reducerede datadækning skyldes midlertidig lukning af målestationen i perioden februar til december 2022 pga. omfattende vejarbejde.

** Datadækningen ved målestationen på Aalborg Gade er for PM_{2,5} på 81%. Den reducerede datadækning skyldes tekniske problemer med LVS-filtre november – december 2022 i forbindelse med ibrugtagning af nyt parti af partikelfiltre.

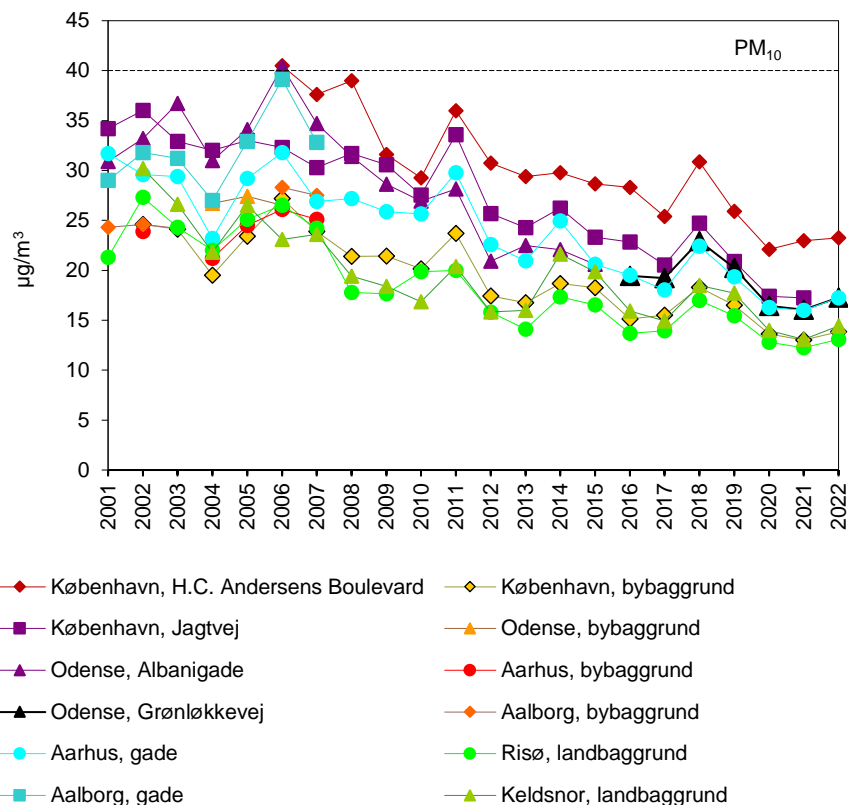
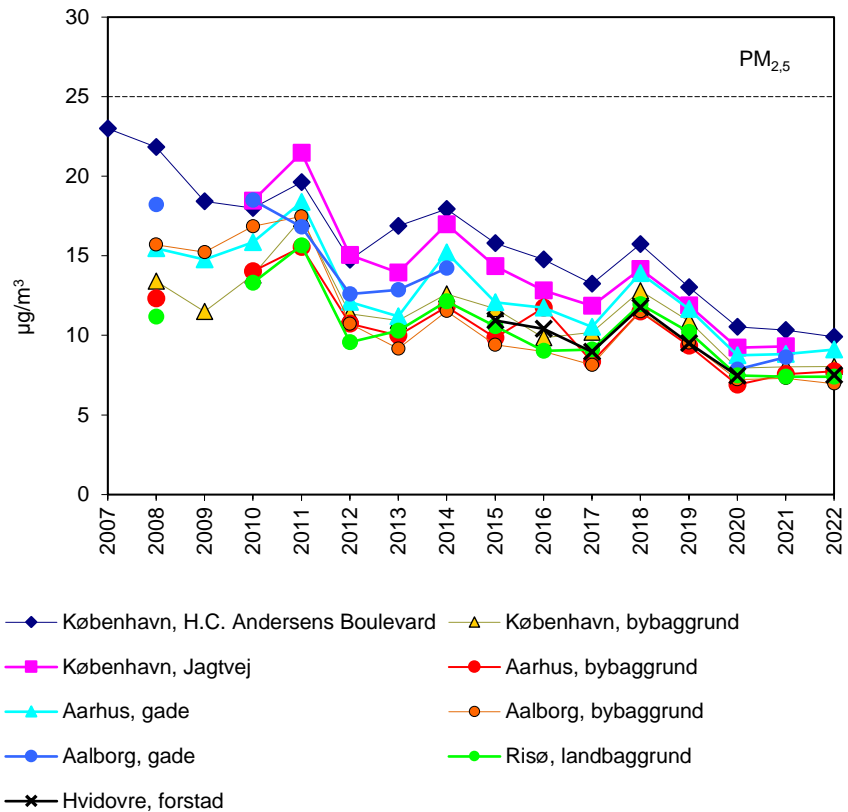
Tabel 7.3. Resultater for 2022 for årsmiddelværdien for antallet af partikler med diameter i intervallerne 11 - 478/550 nm og 41 - 478/550 nm. Der er ingen grænseværdi for partikelantal. EU kræver en dækningsgrad på mindst 85% af kalenderåret. På basis heraf vurderes datadækningen at være tilstrækkelig på alle målestationer, bortset fra Hvidovre, hvor det er lidt forhøjet usikkerhed som følge af den lidt for lave dækningsgrad grundet tekniske fejl på instrumentet i dele af 2022.

	Partikelantal		
	Datadækning %	11 - 478/550 nm Antal/cm ³	41 - 478/550 nm Antal/cm ³
<i>Gade</i> København, H.C. Andersens Boulevard	90	9100	2600
<i>Bybaggrund</i> København	98	3600	1700
<i>Forstad</i> Hvidovre	80	4700	2000
<i>Landbaggrund</i> Risø	94	2800	1400

Forholdet PM₁₀/PM_{2,5} ligger på gadestationerne omkring 2,0, mens det på by- og landbaggrundsstationerne, ligger på omkring 1,8. Dette hænger sammen med, at PM₁₀ omfatter en større del af de luftbårne partikler end PM_{2,5}. Når man kigger på den samme partikelfraktion (respektiv PM_{2,5} eller PM₁₀), 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 PM_{2,5} i henholdsvis bybaggrunden og på gadestationerne end målt ved landbaggrundsmålestationen. Endvidere ligger PM_{2,5} på de tre gademålestationer med tilfredsstillende datadækning (Jagtvejstationen var lukket ned en stor del af 2022) indenfor ±9% af middelværdien. Årsagen til dette er, at langt hovedparten af PM_{2,5} og PM₁₀ er fra luftbåren langtransport, og at der i forbindelse med langtransporten sker en udjævning af de geografiske forskelle.

7.3 Udviklingstendens

Målingerne af PM₁₀ 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 PM₁₀. Der ses et ensartet forløb ved alle målestationerne. PM_{2,5} er faldet med 30-55% og PM₁₀ med 40-50% siden opstart af målingerne i henholdsvis 2007/2008 og 2001.

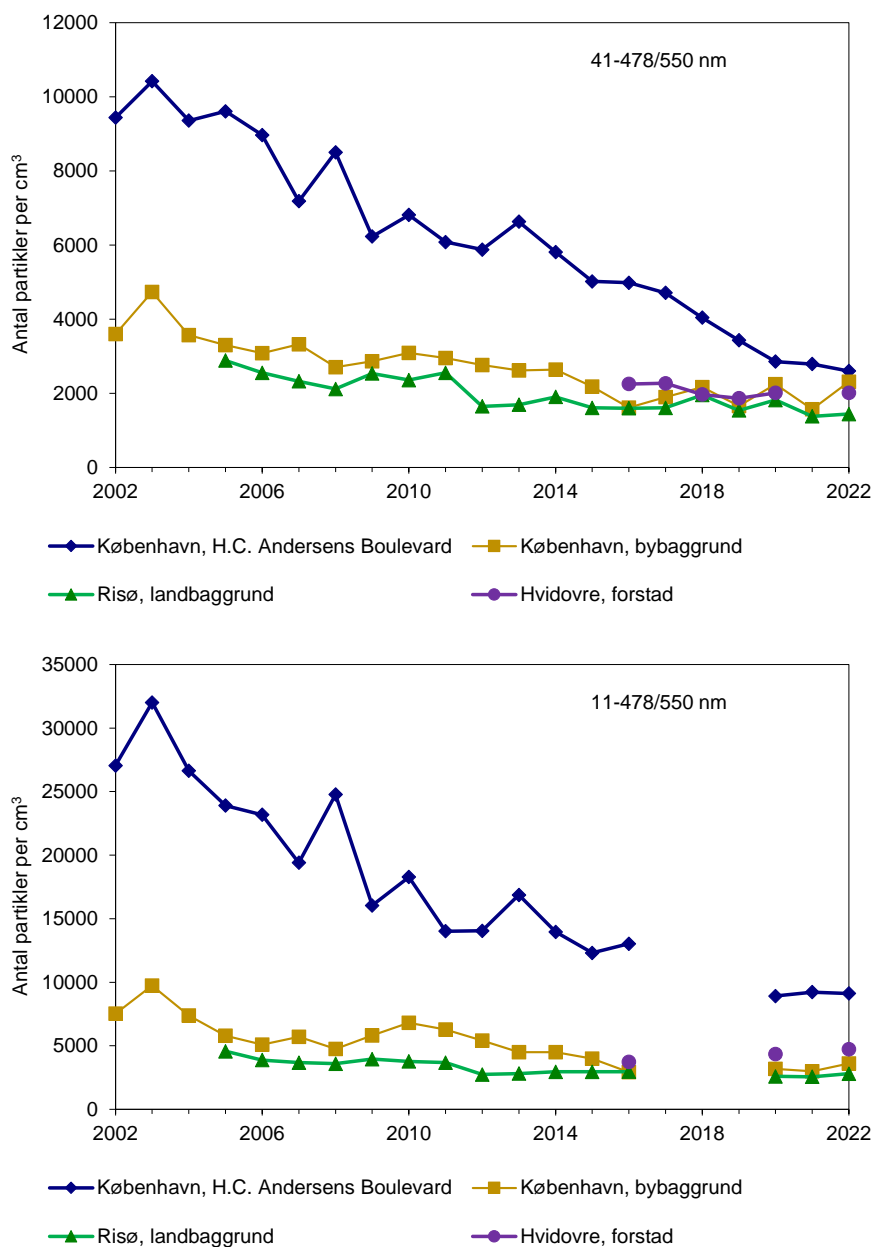


Figur 7.3. Udviklingstendens for årsmiddelværdi af $PM_{2.5}$ (øverst) og PM_{10} (nederst). De stiplede linjer angiver grænseværdierne for årsmiddelværdien af $PM_{2.5}$ og PM_{10} (EU, 2008). Fra og med 2012 er PM -værdierne vist ved ambient temperatur og tryk. Til og med 2011 er PM -værdierne vist ved standard betingelser. Ændringen er ca. 2-4% og er ubetydelig i den grafiske præsentation. I graferne for $PM_{2.5}$ og PM_{10} for Jagtvej er 2022-værdierne ikke vist pga. lav datadækning forårsaget af midlertidig stationslukning feb.-dec. For $PM_{2.5}$ Aalborg bybaggrund har årsmiddelværdien for 2022 lidt højere usikkerhed end normalt, da datadækningen kun er på 81% grundet fejl på prøveopsamlingen i en mindre del af året.

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 ovenfor omtalte 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 den samlede partikelfraktion (11 - 478/550 nm) faldet med omkring 70% ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard og 60% ved bybaggrundsmålestationen i København. Målinger i landbaggrund ved Risø er først begyndt i 2005, men siden da er partikelantallet faldet med omkring 35% for den samlede partikelfraktion (11- 478/550 nm).

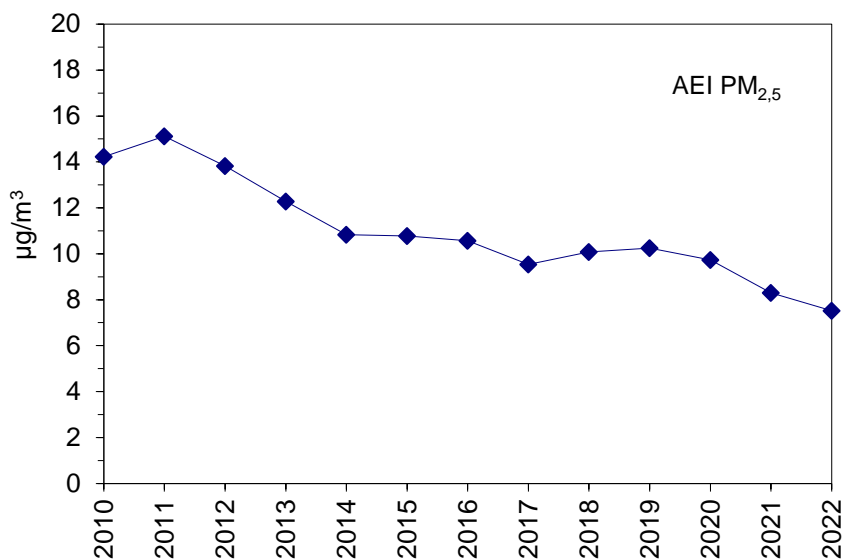
Tidsserien for målingerne i forstad (Hvidovre) er relativt kort (begyndt 2015), men siden opstart er partikelantallet faldet med omkring 10% for partikelfractionen fra 41 til 478/550 nm. Tidsserien er relativt kort og derfor er udviklingstendensen forbundet med stor usikkerhed. For partikelfractionen 11 - 478/550 nm er der med kun tre årsmiddelværdier for få data til, at en beregnet procentvis udviklingstendens giver mening.



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. For Hvidovre er 2021-værdien ikke vist pga. lav datadækning forårsaget af stationsflytning.

Det nationale reduktionsmål for $PM_{2,5}$ afhænger af AEI i 2010, som i Danmark lå på $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figur 7.5). AEI for 2010 er beregnet på basis af årgennemsnit for 2008-2010. I henhold til EU's luftkvalitetsdirektiv er det nationale reduktionsmål for Danmark en reduktion i AEI på 15% i 2020 i forhold til 2010 (EU, 2008). For 2020 (gennemsnit for 2018-2020) lå AEI på $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, hvilket ligger på niveau med de nærmeste år op til 2020. 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. For 2022 (gennemsnit for 2020-2022) ligger AEI på $7,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, hvilket er et relativt markant fald i forhold til de seneste år. Siden 2010 i forhold til 2022 er der sket et fald i AEI på omkring 47%.

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



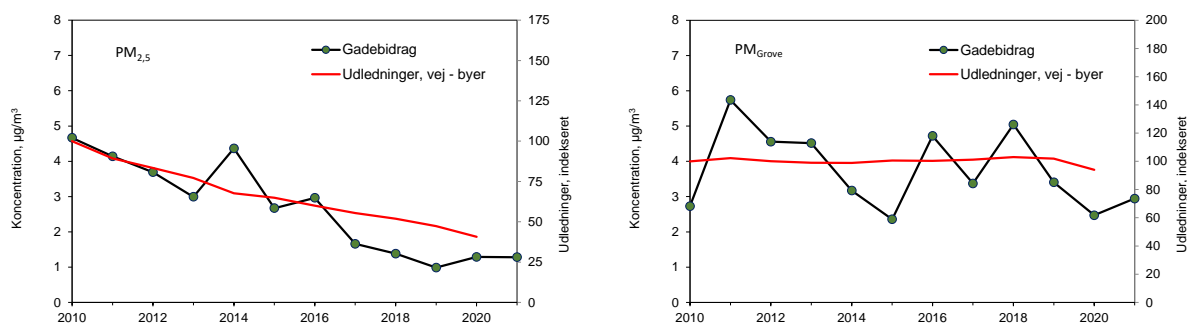
Figur 7.5. Udviklingstendens for Average Exposure Index (AEI) for Danmark siden 2010. AEI beregnes som middel af tre år, så indeks for 2010 er gennemsnit fra 2008-2010 og så fremdeles.

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., 2023).



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., 2023). 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

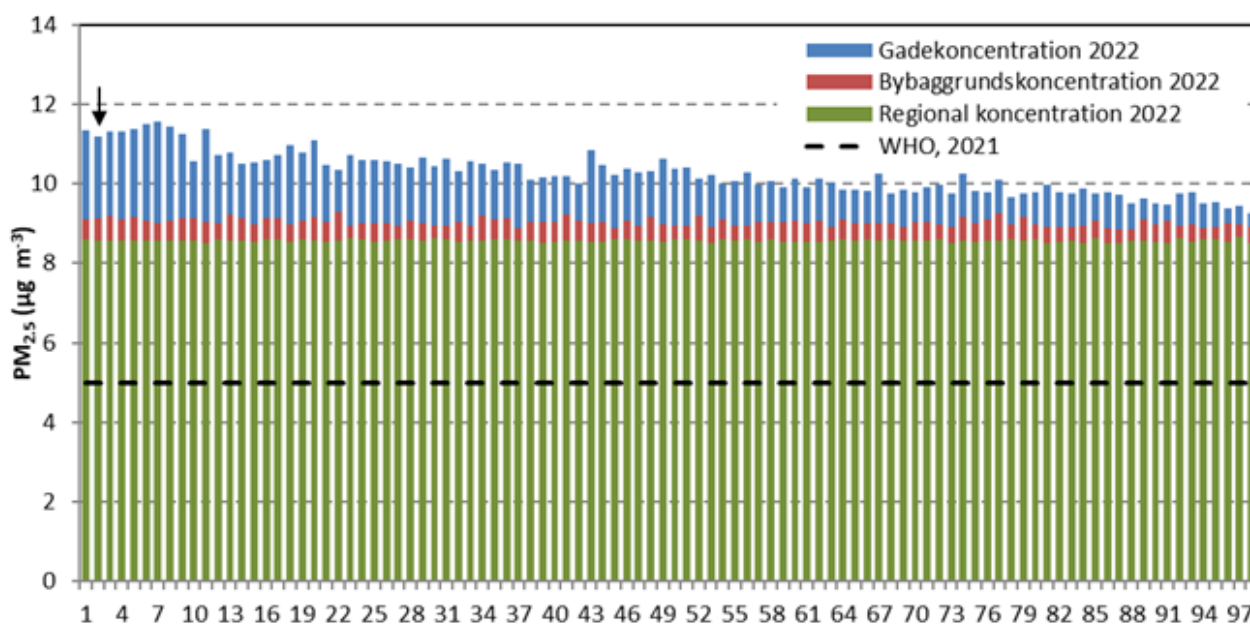
Modelberegninger af årsmiddelkoncentrationer af PM_{2,5} og PM₁₀ for udvalgte gader i København og Aalborg blev første gang rapporteret inden for Det Nationale Luftkvalitetsovervågningsprogram i 2017. De udvalgte gader repræsenterer trafikerede gader og er hovedsageligt lukkede gaderum. Koncentrationerne 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 4.000 og 79.000 køretøjer om dagen i København og mellem 1.900 og 28.500 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).

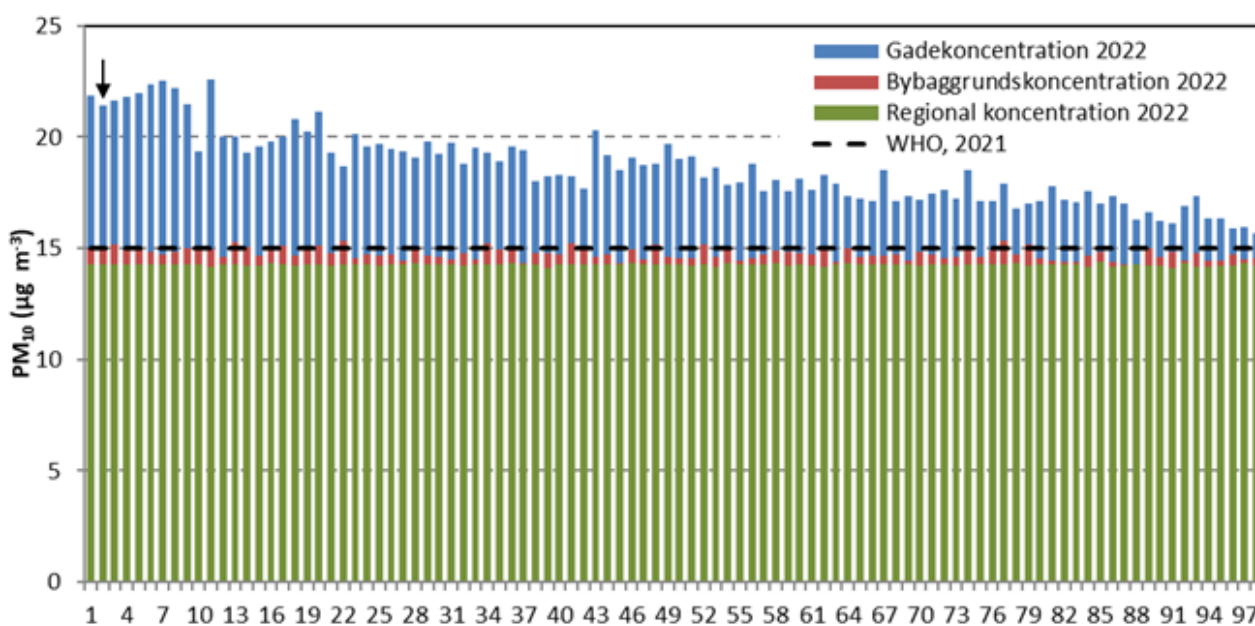
København

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 for PM_{2,5} ligger på 9-11 µg/m³ i 2022 (10-12 µg/m³ i 2021) og for PM₁₀ på 16-23 µg/m³ i 2022 (ligeledes 16-23 µg/m³ i 2021). Der ses således små ændringer i partikelkoncentrationerne fra 2021 til 2022, 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 2022. Gaderne er rangordnet efter koncentrationerne af kvælstofdioxid (Kapitel 2.4). Pilen angiver gadestrækning (HCAB) med en målestation.



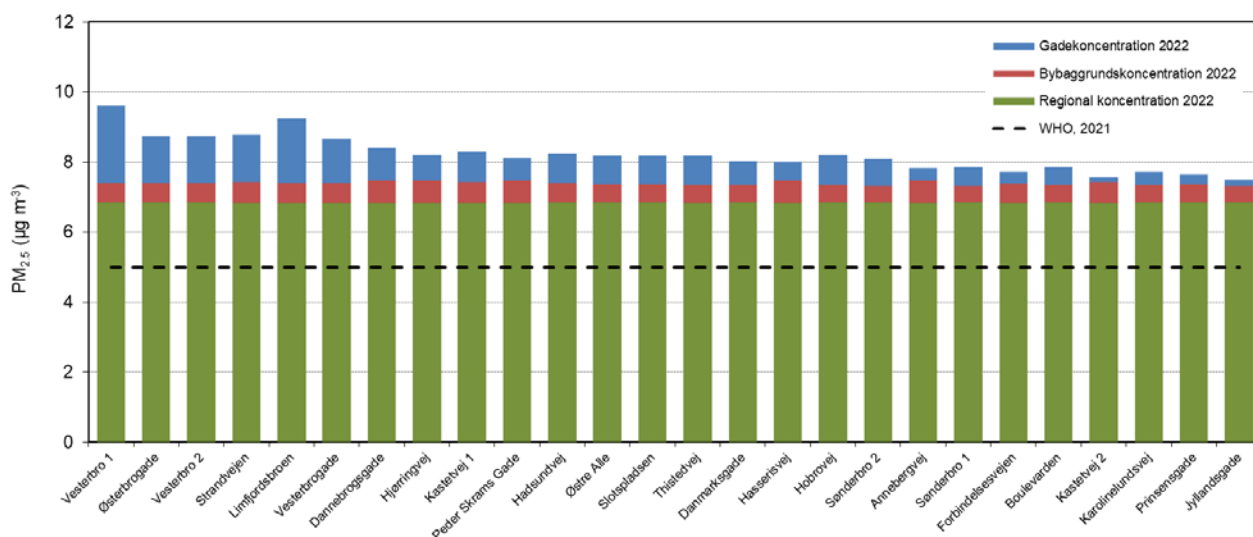
Figur 7.8. Modellerede årsmiddelkoncentrationer for PM_{10} for de 98 udvalgte gadestrækninger i København i 2022. Gaderne er rangordnet efter koncentrationerne af kvælstofdioxid (Kapitel 2.4). Pilen angiver gadestrækning (HCAB) med en målestation.

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 2022 (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.

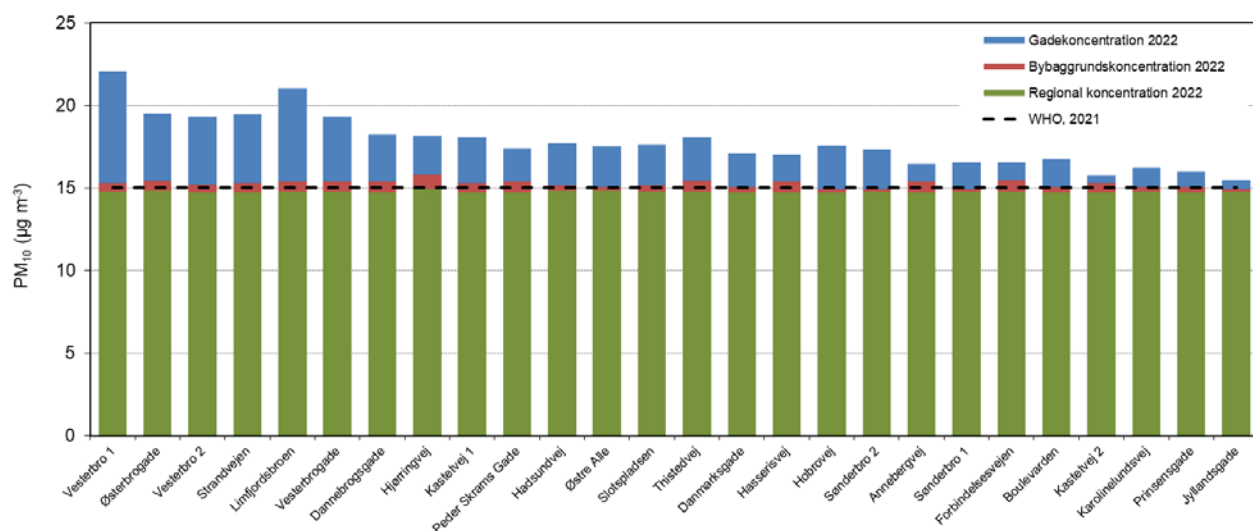
Nr.	Gadenavn	Nr.	Gadenavn	Nr.	Gadenavn
1	H C Andersens Boulevard(2)	34	Toldbodgade	67	Rebildvej
2*	H C Andersens Boulevard(1)	35	Bernstorffsgade(1)	68	Ingerslevsgade
3	Øster Søgade	36	Amagerbrogade(1)	69	Ålholmvej(1)
4	Gyldenløvesgade	37	Nordre Fasanvej(1)	70	Tagensvej(4)
5	H C Andersens Boulevard(3)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

Aalborg

De modellerede årsmiddelkoncentrationer ligger på 8-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2022 (8-11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2021) og 15-22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2022 (16-23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2021) for henholdsvis $\text{PM}_{2,5}$ og PM_{10} . I gennemsnit er årsmiddelkoncentrationer af $\text{PM}_{2,5}$ og PM_{10} faldet lidt fra 2021 til 2022. Et lille fald ses også i målingerne af $\text{PM}_{2,5}$ fra 2021 til 2022. Årsmiddelkoncentrationerne ligger 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 $PM_{2,5}$ for 26 udvalgte gadestrekninger i Aalborg i 2022. Gaderne er rangordnet efter koncentrationerne af kvælstofdioxid (Kapitel 2.4).



Figur 7.10. Modelberegnete årsmiddelkoncentrationer for PM_{10} for 26 udvalgte gadestrekninger i Aalborg i 2022. Gaderne er rangordnet efter koncentrationerne af kvælstofdioxid (Kapitel 2.4).

7.5 Undersøgelse af nord-syd-gradient i koncentrationen af $PM_{2,5}$

I efteråret 2022 blev der gennemført en målekampagne med måling af koncentrationerne af $PM_{2,5}$ i landbaggrund på "langs" af Jylland, hvor den ene målestation var placeret ved Sindal i Nordjylland og den anden var placeret i Store Jyndevad i Sønderjylland tæt ved den dansk-tyske grænse (Figur 7.11). Baggrunden for denne målekampagne er følgende:

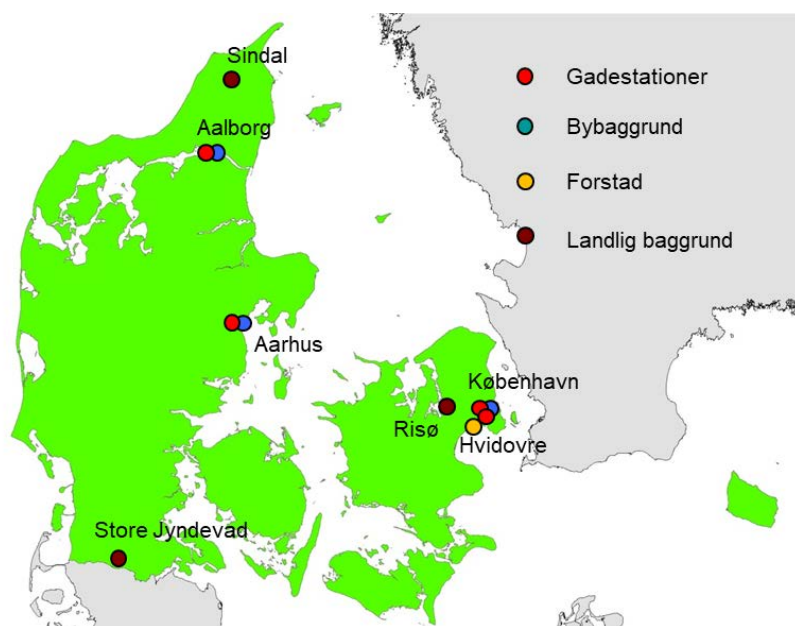
- I overvågningsprogrammet indgår kun en fast målestation (Risø) med måling af $PM_{2,5}$ i landbaggrund i Danmark og der er således ingen målinger af $PM_{2,5}$ i landbaggrund i Jylland.

- Resultater fra modelberegningerne indikerer, at der er en nord-syd-gradient i koncentrationerne af $PM_{2.5}$ i landbaggrundsområder gennem Danmark, med stigende koncentrationer fra nord til syd (se for eksempel Jensen et al., 2023 og EEA, 2020).
- Målingerne på gademålestationen på Jagtvej var midlertidigt standset i perioden fra februar til december 2022 på grund af omfattende vejarbejde på Jagtvej. Dette frigav både arbejdsressourcer og måleudstyr i 2022, som kunne anvendes til en ekstra målekampagne.

Da udsættelse for $PM_{2.5}$ gennem lang tid er hovedårsagen til de helbredsskadelige effekter af luftforureningen (se Kapitel 12) blev det prioriteret at gennemføre målinger af variationen i koncentrationen af $PM_{2.5}$ på langs af Jylland med henblik på at få nye data som kan anvendes til validering af de modelberegnete geografiske variationer i koncentrationen af $PM_{2.5}$ i Jylland.

I foråret 2022 blev der fundet to egnede lokaliteter i Jylland, hvor den ene er beliggende ved Sindal i Nordjylland og den anden er beliggende ved Store Jyndevad få km fra den dansk-tyske grænse. Ved begge målestationer blev der opstillet en low volume sampler til døgnopsamling af $PM_{2.5}$ på partikelfiltre med efterfølgende gravimetrisk bestemmelse af den opsamlede mængde af $PM_{2.5}$. Denne metode er den samme som anvendes rutinemæssigt ved de øvrige målestationer og er EU's referencemetode til måling af $PM_{2.5}$. Ved Store Jyndevad varetog medarbejdere under DCA skift af partikelfiltre i low volumen samplerne og ved Sindal blev denne opgave varetaget af medarbejdere fra Naturstyrelsen. Stationspasserne takkes for deres værdifulde medvirken til gennemførelse af målingerne.

Begge lokaliteter kan kategoriseres som landbaggrund, og repræsenterer således større områder, hvor der ikke i væsentlig grad skulle være en påvirkning fra lokale antropogene (menneskeskabte) udledninger. Afstanden mellem de to stationer er ca. 300 km i fugleflugtslinje, hvor målestationen ved Sindal ligger omkring NNØ i forhold til stationen ved Store Jyndevad (Figur 7.11).

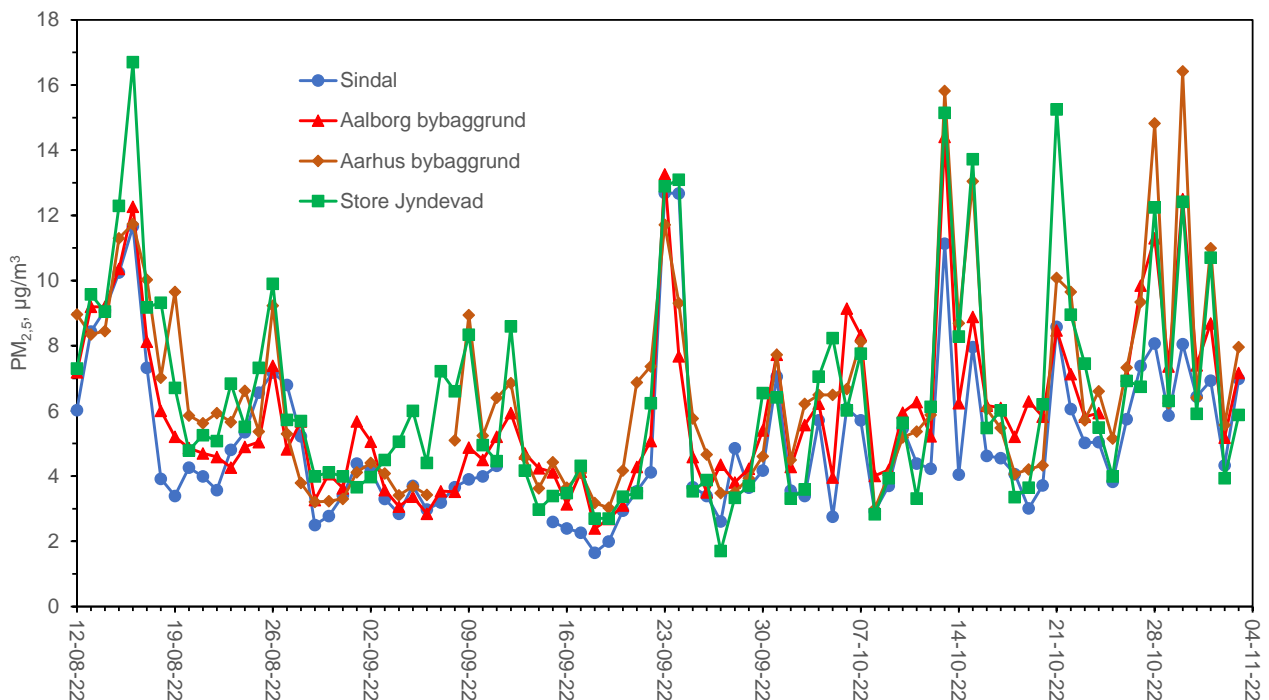


Figur 7.11. Placering af de to ekstra målestationer i landbaggrund ved Sindal i Nordjylland og Store Jyndevad i landbaggrund i Sønderjylland. Kortet viser også de øvrige målestationer, hvor der måles $PM_{2.5}$ i Danmark.

Målekampagnen forløb over perioden fra den 12. august til 3. november 2022. Det var oprindeligt planen, at målekampagnen skulle vare adskillige måneder længere, men tekniske problemer med partikelfiltrenes kvalitet gjorde det nødvendigt at stoppe målingerne tidligere end planlagt.

Figur 7.12 viser døgnmiddelmålingerne for de to målestationer og til sammenligning vises også resultaterne fra døgnmiddelmålingerne fra bybaggrundsmålestationerne i Aarhus og Aalborg. Overordnet set ses relativt ensartede tidlige variationer i døgnmiddelmålingerne mellem $PM_{2,5}$ i syd ved Store Jyndeved og mod nord ved Sindal, selv om der også er en vis forskel mellem de to målestationer. Resultaterne fra bybaggrundsmålestationerne passer også med i dette billede, hvor koncentrationerne ved bybaggrundsmålestationen i Aalborg i høj grad minder om koncentrationerne målt ved Sindal og bybaggrundsmålestationen i Aarhus i et vist omfang minder om koncentrationerne ved Store Jyndeved. Dette billede hænger sammen med, at $PM_{2,5}$ har lang opholdstid i atmosfæren og derfor bliver de geografiske variationer af $PM_{2,5}$ jævnet ud af luftmassernes bevægelser.

Den tidsmæssige variation fra dag til dag skyldes for en stor del de naturlige variationer i de meteorologiske forhold, hvor for eksempel vindretninger fra nord typisk vil give anledning til relativt lave koncentrationer, mens vindretninger fra syd og øst vil give anledning til relativt høje koncentrationer, som følge af transport af forurenede luft fra landene syd for Danmark. Ved de fire målestationer ses et ensartet mønster, hvor toppe med relativt høje koncentrationer oftest falder på de samme dage, og hvor perioder med relativt lave koncentrationer som regel ses i de samme perioder ved alle fire målestationer. Denne ensartethed hænger sammen med, at de overordnede meteorologiske forhold er relativt ensartede i Jylland på døgnbasis – med andre ord, hvis det for eksempel blæser fra nordlige retninger i Nordjylland, så blæser det som regel også fra samme retninger i Sønderjylland.



Figur 7.12. Døgnmiddelmålingerne af $PM_{2,5}$ ved målestationerne i landbaggrund ved Sindal i Nordjylland og Store Jyndeved i Sønderjylland samt ved bybaggrundsmålestationerne i Aalborg og Aarhus.

Tabel 7.7 viser middelkoncentrationerne for måleperioden ved landbaggrundsmålestationerne ved Sindal og Store Jyndeved, de to bybaggrundsmålestationer i Aalborg og Aarhus samt ved gademålestationerne i Aarhus og Aalborg. Tabellen inkluderer også et estimat for landbaggrund i nærheden af Aalborg og Aarhus til sammenligning. Estimatet er baseret på, at den målte forskel mellem landbaggrundsmålestationen ved Risø og bybaggrundsmålestationen i København udgør omkring 10% af årsmiddelværdien for PM_{2,5} og at den har gjort dette i en årrække (Kapitel 7.2 og 7.3).

Målingerne viser, at der er en forskel på middelkoncentrationerne ved landbaggrundsmålestationerne i nord og syd på omkring 1,4 µg/m³, hvor middelkoncentrationerne er lavest i nord. Forskellen udgør omkring 20% af den målte middelværdi for PM_{2,5} for perioden. Denne forskel stemmer nogenlunde overens med modellerede årsmiddelværdier af PM_{2,5} for 2020 (Jensen et al., 2023, bilag 1), hvor forskellen mellem de to lokaliteter synes at ligge på omkring 1,5 µg/m³.

Af tabellen fremgår også, at de estimerede middelkoncentrationer i landbaggrund ved Aalborg og Aarhus sammen med de målte koncentrationer ved de to landbaggrundsmålestationer danner en gradient med stigende koncentrationer fra nord til syd, hvilket er i overensstemmelse med resultaterne fra modelberegningerne. Årsagen til de stigende koncentrationer fra nord til syd er, at udledningerne af luftforurening er større i landene syd for Danmark end i landene nord for Danmark.

Undersøgelsens resultater viser, at der eksisterer en koncentrationsgradient for PM_{2,5} hen over Danmark. Den målte forskel er relativt lille, men er i overensstemmelse med hvad målinger i andre europæiske lande og luftforureningsmodeller har indikeret. Det var ønskværdigt, men ikke muligt at gennemføre målingerne over et fuldt kalenderår, hvilket kunne have givet et mere solidt resultat. Resultaterne vil blive anvendt ved de kommende valideringer af kvaliteten af modelberegninger af PM_{2,5} i forbindelse af NOVANA.

Tabel 7.7. Middelkoncentrationer af PM_{2,5} (µg/m³) ved landbaggrundsmålestationerne ved Sindal og Store Jyndeved, bybaggrunds- og gademålestationerne i Aalborg og Aarhus. Middelkoncentrationerne er beregnet for de 79 dage i måleperioden, hvor der er resultater ved alle målestationer, således eventuelle forskelle i datadækning ikke har indflydelse på sammenligning mellem målestationerne. De røde tal i kursiv for Aalborg og Aarhus er et estimat beregnet, som 90% af middelkoncentrationerne i bybaggrund i henholdsvis Aalborg og Aarhus.

	Landbaggrund	Bybaggrund	Gade
Sindal	5,1		
Aalborg	5,4	6,0	7,7
Aarhus	5,9	6,6	7,9
Store Jyndeved	6,5		

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 betegnelser. 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 luftbårne 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 Institut, forstad Hvidovre, landbaggrund Risø).

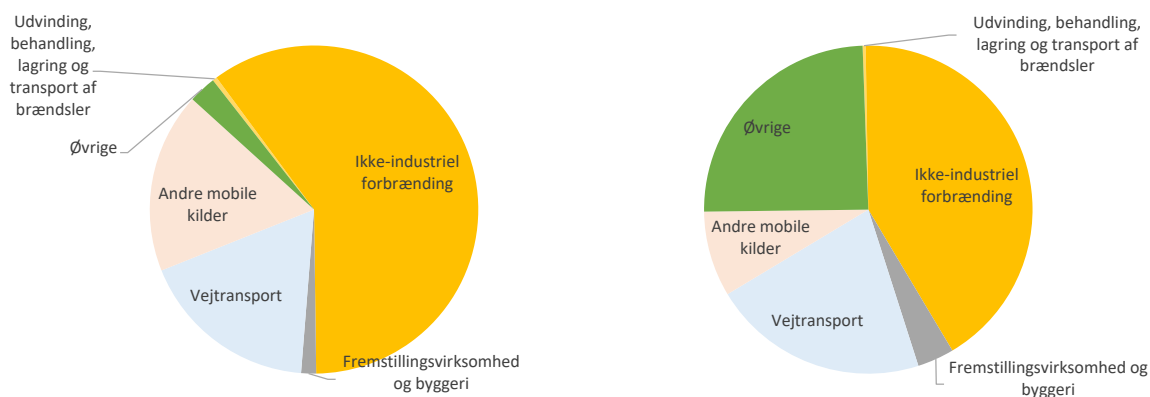
8.1 Udledninger

Den vigtigste kilde til udledningerne af black carbon i 2021 er helt klart ikke-industriell forbrænding, som står for 60% 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 18% af udledningerne og er de næststørste kilder til black carbon.

Tidligere var det mobile kilder, som var den vigtigste kilder 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-industriell forbrænding i dag på stort set samme niveau som i 1990, hvilket er forklaringen på, at ikke-industriell 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 92%), 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-industriell forbrænding dog udgør mere end halvdelen af udledningerne i Danmark, mens de kun udgør omkring 42% på EU-niveau. Faldet i udledningerne er noget større i Danmark end for EU-27 (Figur 8.2).

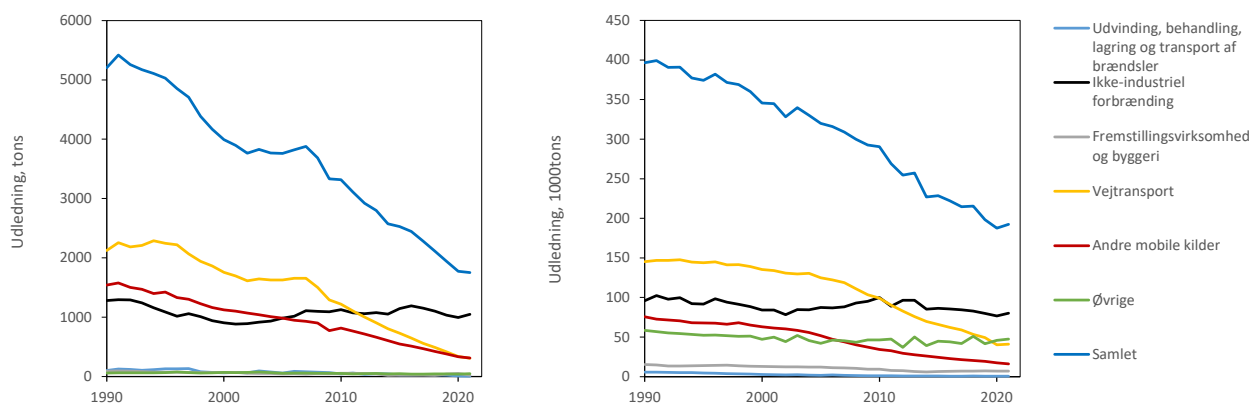


Figur 8.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af black carbon i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2021. Figurene viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2023, CEIP, 2023).

Tabel 8.1. Kilderne til menneskabte udledninger af black carbon i Danmark i 2021 (Nielsen et al., 2023). 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 2021	
		Tons	%
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	29	2
Ikke-industriel forbrænding	2	1051	60
<i>Handel og service</i>	201	18	1
<i>Husholdninger</i>	202	767	44
<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	203	266	15
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	26	1
Industrielle processer	4	2	0
Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	5	8	0
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	8	0
Vejtransport	7	310	18
<i>Udstødning</i>	701-706	142	8
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	169	10
Andre mobile kilder*	8	312	18
Affald	9	0	0
Landbrug	3b,d,f-i	9	0
Samlet		1754	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., 2023; 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.

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.

Årsmiddelkoncentrationerne 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 2022. EU kræver en dækningsgrad på mindst 85% af kalenderåret. På basis heraf vurderes datadækningen at være tilstrækkelig på alle målestationer.

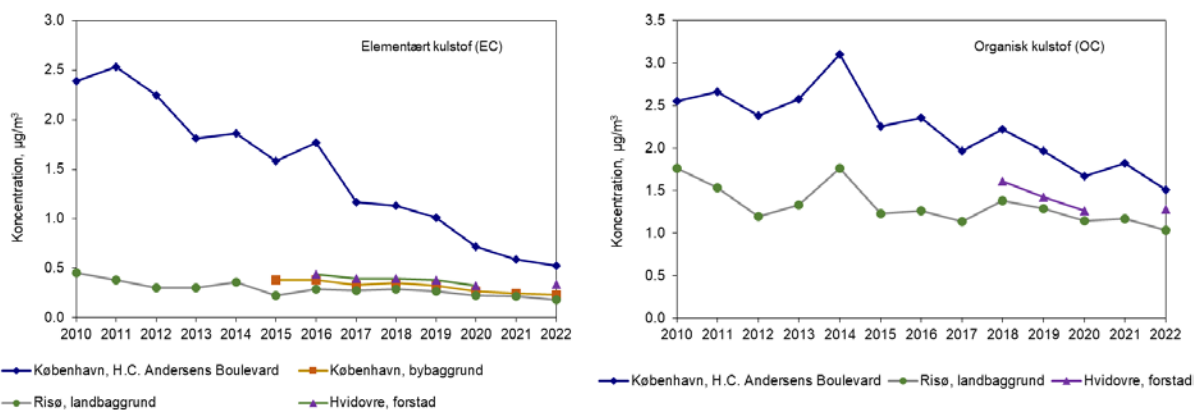
	Datadækning %	Elementært kulstof µg/m ³	Organisk kulstof µg/m ³
<i>Gade</i>			
København, H.C. Andersens Boulevard	99	0,52	1,51
<i>Bybaggrund</i>			
København	99	0,23	
<i>Forstad</i>			
Hvidovre	98	0,34	1,27
<i>Landbaggrund</i>			
Risø	99	0,18	1,03

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 (omkring 60%). 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.

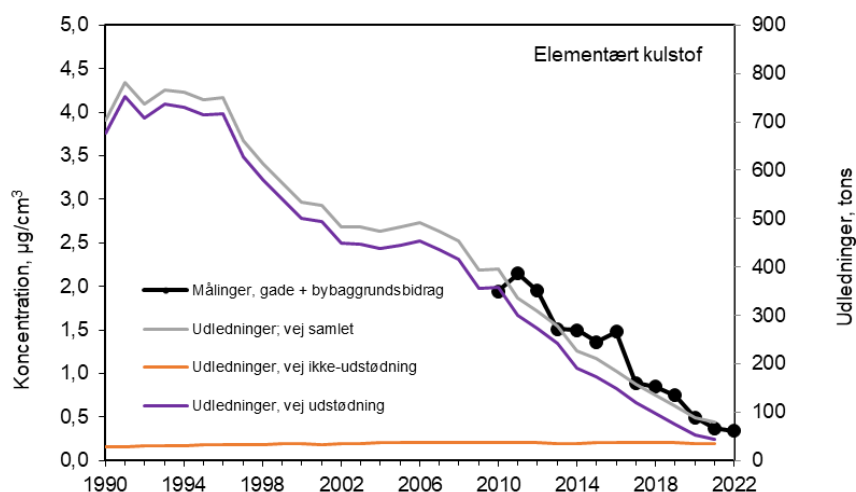
Der ses også fald i årsmiddelkoncentrationerne af organisk kulstof, men det er et noget mindre fald (35% siden 2010) end for elementært kulstof. De relativt høje værdier ved begge målestationer i 2014 skyldes formentligt år til år variationer i de meteorologiske forhold.

Det skal bemærkes, at Figur 8.3 ikke viser data for Hvidovre 2021 grundet flytning af stationen. Derudover måles der ikke organisk kulstof ved bybaggrundsmålestationen.



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 påbegyndt 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. Figureerne 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., 2023). 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 den danske luftovervågning kan baseres på de svenske målinger på Råö tæt ved Gøteborg. 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 2021 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 2021 fordelt på hovedkategorier (Nielsen et al., 2023). 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**	0,15	1,8	0,57	1,1	1,2	0,54	20
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	0,10	1,9	0,02	0,19	0,19	2,4	2,3
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	0	0	0	0	0	0	0
Vejtransport	0,04	8,7	0,05	1,7	0,22	61	32
Andre mobile kilder*	0,01	0,04	0,01	0,01	0,02	0,02	0,91
Affald	0	2,2	0,01	0,01	0,01	0,08	8,5
Landbrug	0	0	0,02	0	0	0	0,01
Samlet	0,30	15	0,67	3,0	1,6	64	64

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

**Data inkluderer alle emissioner fra stationære forbrændingsanlæg herunder kraftvarmeanlæg, affaldsforbrændingsanlæg, industriell forbrænding samt ikke-industriell forbrænding (små anlæg indenfor handel & service, husholdninger og landbrug)

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 89% 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.

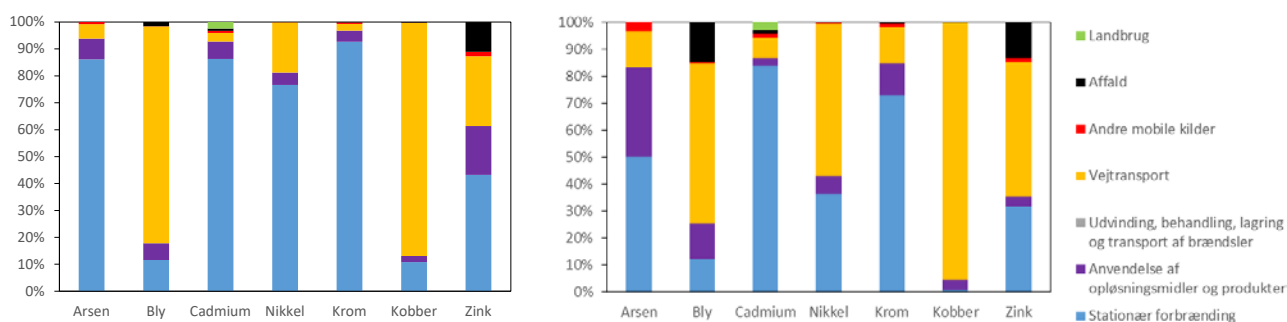
For arsen, nikkel og krom er der sket reduktioner på mellem 73 og 84%, hvilket navnlig skyldes forbedringerne i relation til forbrændingsanlæg. For cadmium er der sket en lidt mindre reduktion på omkring 45%. Faldet skyldes for en stor del fald i udledninger fra stationær forbrænding, men for cadmium 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 15%. Der har været et relativt stort fald i forbindelse med stationær forbrænding, men dette

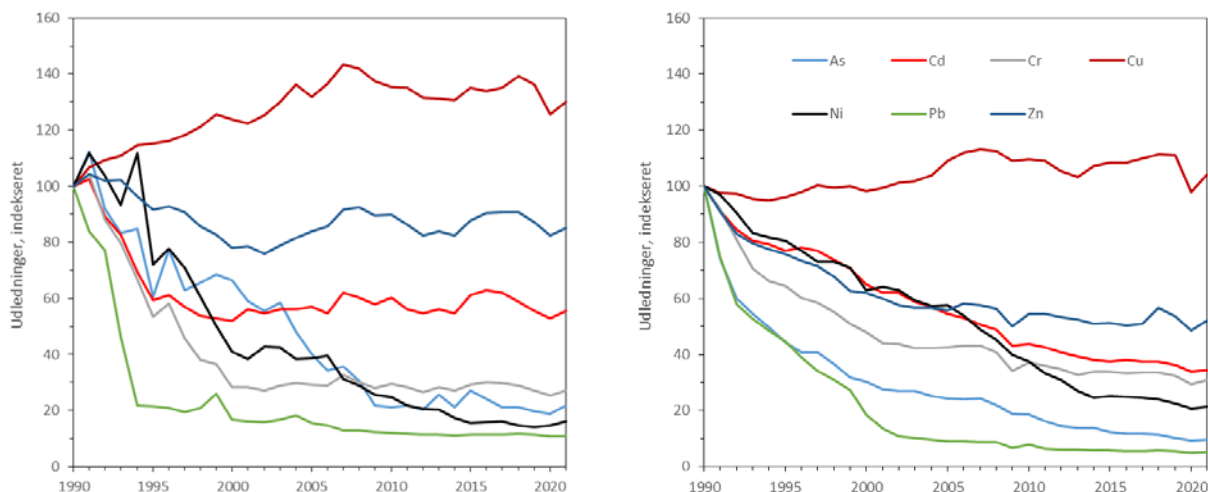
fald er stort set modsvaret af en øgning af udledningerne fra vejtransport, hvor zink kommer fra slid af bremses og dæk.

Kobber er i modsætning til de øvrige stoffer steget med omkring 30% siden 1990, dog med den mest markante stigning i perioden fra 1990 til midten af nullerne. Herefter har kobber ligget på et mere konstant niveau. Den generelle stigning skyldes øgning af udledningerne fra vejtransport, hvor der har været en stor stigning i udledningen fra slid på bremserne, som følge af en øget vejtrafik.

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 en mindre markant stigning 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 2021 (højre), (Nielsen et al., 2023).



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., 2023; 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 PM₁₀, mens det ved landbaggrundsmålestationerne er målinger af indholdet i TSP (Total Suspended Particulate matter). 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 partikelfraktion, 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 2022 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.

For jern er der for 2022 forhøjet usikkerhed på analysemetoden for Anholt i perioden 26. juni 2022 til 17. august 2022 samt Risø i perioden 11. november 2022 til årets udgang. Men alle kontrolparametre i analysen er overholdt og der er tillid til årsmiddelværdien.

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 2022 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). EU kræver en dækningsgrad på mindst 85% af kalenderåret. På basis heraf vurderes datadækningen at være tilstrækkelig på alle målestationer.

	Datadækning %	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	99	0,5	2,4	0,06	1,9	7,9	1575	49	18	2,4	34
Aarhus, Banegaardsgade	99	0,4	1,6	0,05	0,9	1,7	410	15	5,8	1,5	16
<i>Bybaggrund (PM₁₀)</i>											
København	99	0,3	1,5	0,05	0,9	0,8	200	5,9	3,7	1,9	9,3
<i>Landbaggrund (TSP)</i>											
Anholt	98	0,3	1,0	0,03	0,8	0,7	77	1,5	2,4	1,8	6,7
Risø	98	0,4	1,5	0,05	0,6	0,6	114	3,5	2,9	1,3	11

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). Der foreligger desværre ingen informationer om dækningsgrad, men det vurderes, at den vil være tilstrækkelig god, da disse data er indrapporteret til EU.

	Kviksølv, samlet gasform (ng/m ³)	Kviksølv, samlet partikelform (ng/m ³)
Råö, Gøteborg, Sverige	1,2	0,0009

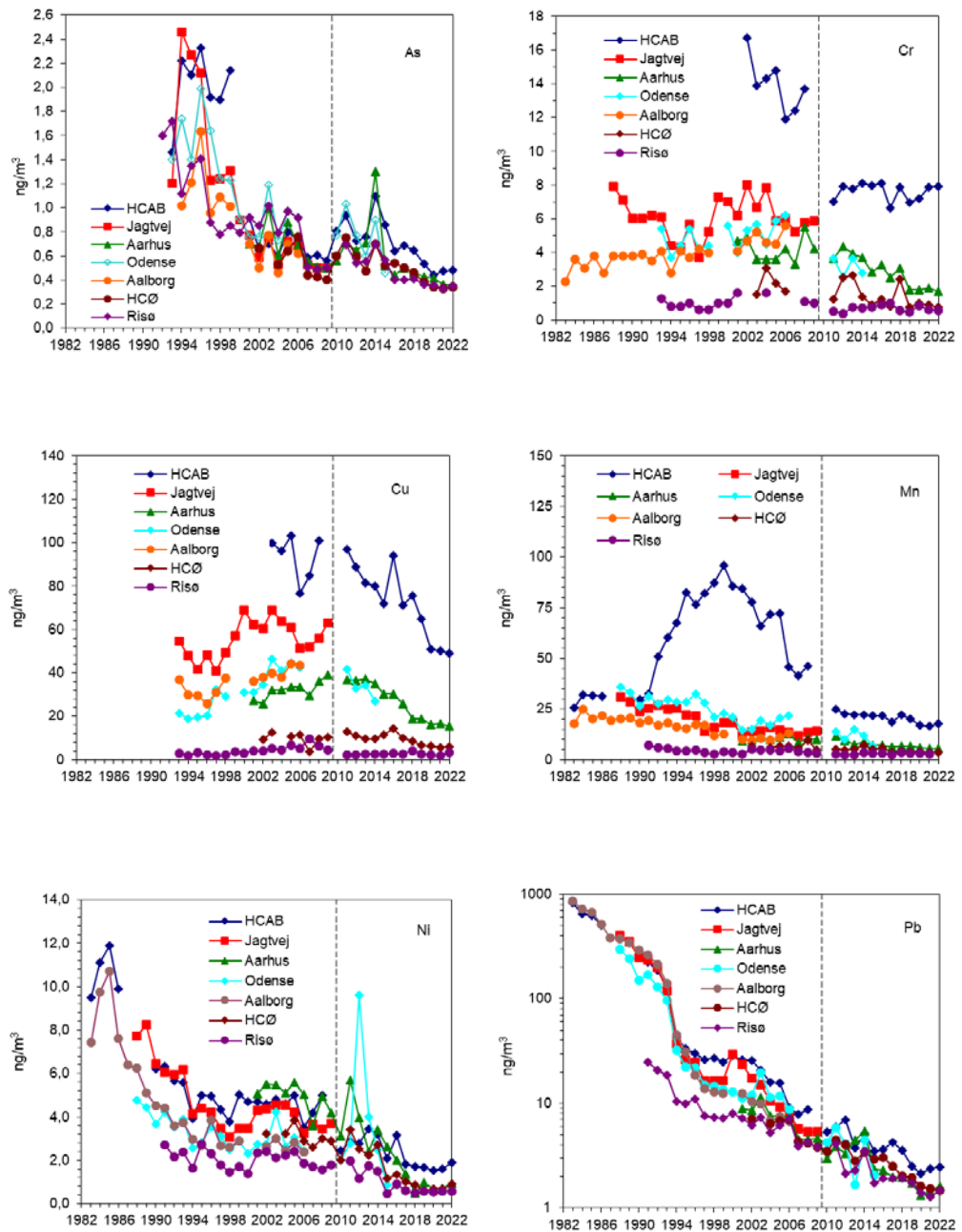
9.3 Udviklingstendens

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. Målingerne til og med 1999 er 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 Bulevard (Figur 9.3), da vejbelægningen ud for målestationen frem til 2009 indeholdt slagger fra stålvalseværket i Frederiksværk (vejen blev nyasfaltert i 2009).

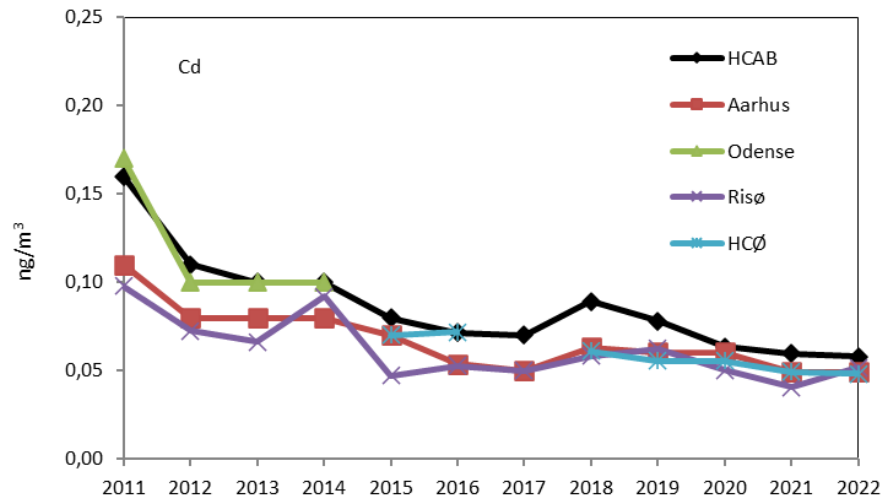
For hovedparten af stofferne er der sket et betydeligt fald i koncentrationerne. Mest markant for bly, hvor koncentrationen er faldet med mere end 99% siden 1982 på H.C. Andersens Boulevard. Arsen er faldet med omkring 78% siden 1990 og nikkel med omkring 70% siden 1982. Mangan er faldet med omkring 40% 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 ligeledes er steget markant siden 1990 og frem til midtnullerne. 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., 2023). 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 her-efter 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/m^3 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]fluoranthren, benz[k]fluoranthren, indeno[1,2,3-cd]pyren og bibenz[a,h]anthracen).

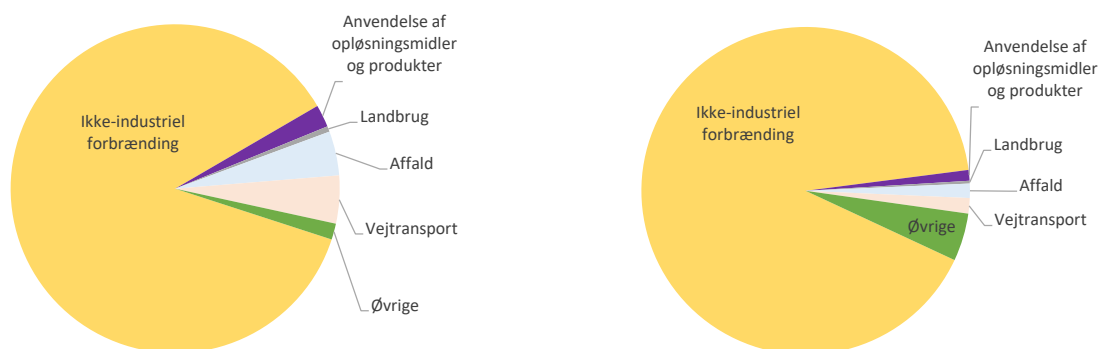
Status og udvikling i luftkoncentrationer af polycykliske aromatiske kulbrinter overvåges i 2022 ved målinger på en gademålestation i København (H.C. Andersens Boulevard) og på forstadsmålestationen i Hvidovre. Det er kun den partikelbundne del af disse polycykliske aromatiske kulbrinter som indgår i 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-industriell 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 2021 (Figur 10.1 og tabel 10.1; Nielsen et al., 2023). 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 63% set over hele perioden fra begyndelsen af 1990'erne til 2021 (Figur 10.2; Nielsen et al., 2023). 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 brændeforbruget faldet med 35% siden 2016 (Energistyrelsen, 2020).

For EU-27 er det også den ikke-industrielle forbrænding, som står for hovedparten af udledningerne (omkring 91%; Figur 10.1). For EU-27 er de øvrige kilder, fremstillingsvirksomhed og byggeri (1,6%) og vejtransport (1,5%), som er de næst vigtigste kilder. Udledningerne fra EU-27 er faldet med omkring 49% 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.

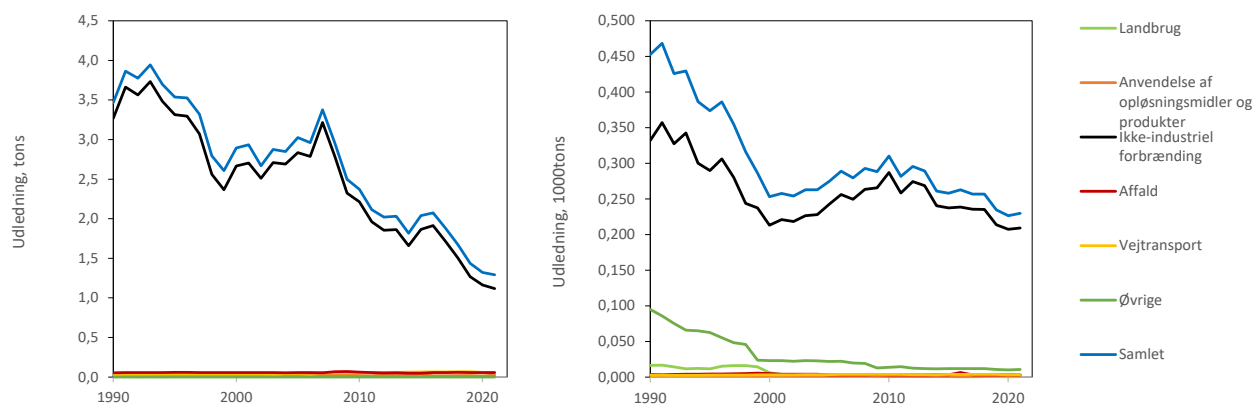


Figur 10.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af benz[a]pyren i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2021. Figureerne viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2023, CEIP, 2023).

Tabel 10.1. Kilderne til de menneskabte udledninger af benz[a]pyren i Danmark i 2021 (Nielsen et al., 2023). 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 2021	
		Tons	%
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	0,01	1
Ikke-industriel forbrænding	2	1,12	87
<i>Handel og service</i>	201	0,06	5
<i>Husholdninger</i>	202	0,98	76
<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	203	0,07	5
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	0,00	0
Industrielle processer	4	0,00	0
Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	5	0,00	0
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	0,03	2
Vejtransport	7	0,06	5
<i>Udstødning</i>	701-706	0,06	4
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	0,00	0
Andre mobile kilder*	8	0,01	1
Affald	9	0,06	4
Landbrug	3b,d,f-i	0,01	1
Samlet		1,29	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., 2023; 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 2022 var koncentrationerne af benz[a]pyren omkring 60% højere ved målestationen i Hvidovre sammenlignet med gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard (Figur 10.3). Den højere koncentration 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. Ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard kommer hovedparten af benz[a]pyren ligeledes fra brændefyring, men der er mindre anvendelse af brændefyring tæt ved gademålestationen sammenlignet med omkring målestationen i Hvidovre. Ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard er der endvidere også et mindre bidrag fra den intense trafik på H.C. Andersens Boulevard.

For hovedparten af de øvrige polycykliske aromatiske hydrocarboner ses også, at niveauet er omkring en halv gang højere ved målestationen i Hvidovre sammenlignet med gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard.

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 var det tidligere ikke muligt at separere benz[b]fluoranthren og benz[k]fluoranthren, men for 2022 er analysemetoden blevet forbedret, så det nu er muligt at separere de tre isomerer. EU kræver en dækningsgrad på mindst 85% af kalenderåret. På basis heraf vurderes datadækningen at være tilstrækkelig på alle målestationer.

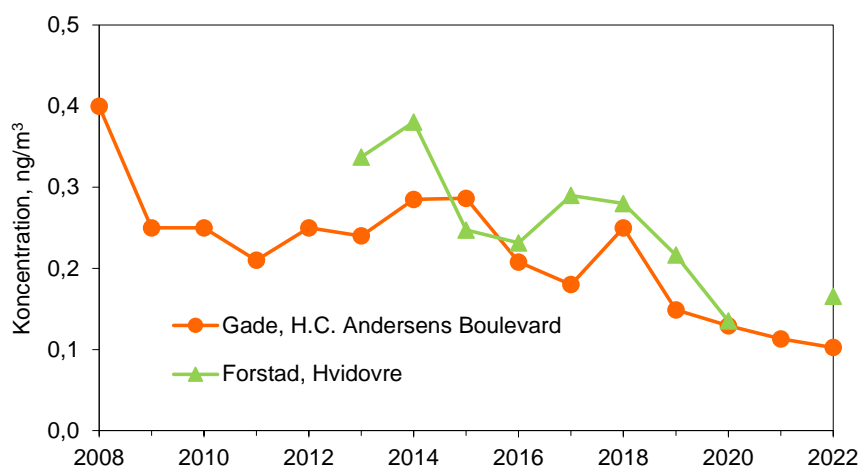
	Datadækning	Benz[a]- pyren	Benz[a]- anthra- cen	Benz[b]- fluoran- then	Benz[j]- fluoran- then	Benz[k]- fluoran- then	In- deno[1,2,3- cd]-pyren	Dibenz[a,h]- anthracen
	%	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³
Målværdi		1						
<i>Gade</i>								
København, H.C. Andersens Boulevard	100	0,10	0,08	0,17	0,09	0,08	0,16	0,01
<i>Forstad</i>								
Hvidovre	100	0,17	0,12	0,24	0,14	0,12	0,23	0,02

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 årsmiddelmålingen faldet med omkring 62% og ved forstadsmålestationen i Hvidovre ses et fald på omkring 68% 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 sket et relativt stort fald i udledningerne blandt andet som følge af et 35% fald i brændeforbrug siden 2016 (Energistyrelsen, 2020).

Målestationen i Hvidovre blev flyttet omkring 600 m i 2021, og da udledninger fra brændefyring kan variere betydeligt på lokalskala, så skal det tages med i betragtning, at flytningen i 2021 kan have givet ændringer i niveauet fra 2020 til 2022. Dette kan være årsagen til, at der ved målestationen i Hvidovre ses en stigning fra 2020 til 2022, mens der ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard ses et fald. Det er dog endnu for tidligt at vurdere om flytningen har givet anledning til et mindre "hop" opad i koncentrationerne.

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. Bemærk at målestationen i Hvidovre blev flyttet omkring 600 m i 2021, og at dette kan give anledning til ændring i niveauet fra 2020 til 2022. Data for 2021 for målestationen i Hvidovre er udeladt grundet flytningen.

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, Mg²⁺; ammonium, NH₄⁺; nitrat, NO₃⁻; sulfat, SO₄²⁻; kalium, K⁺; calcium, Ca²⁺) 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.

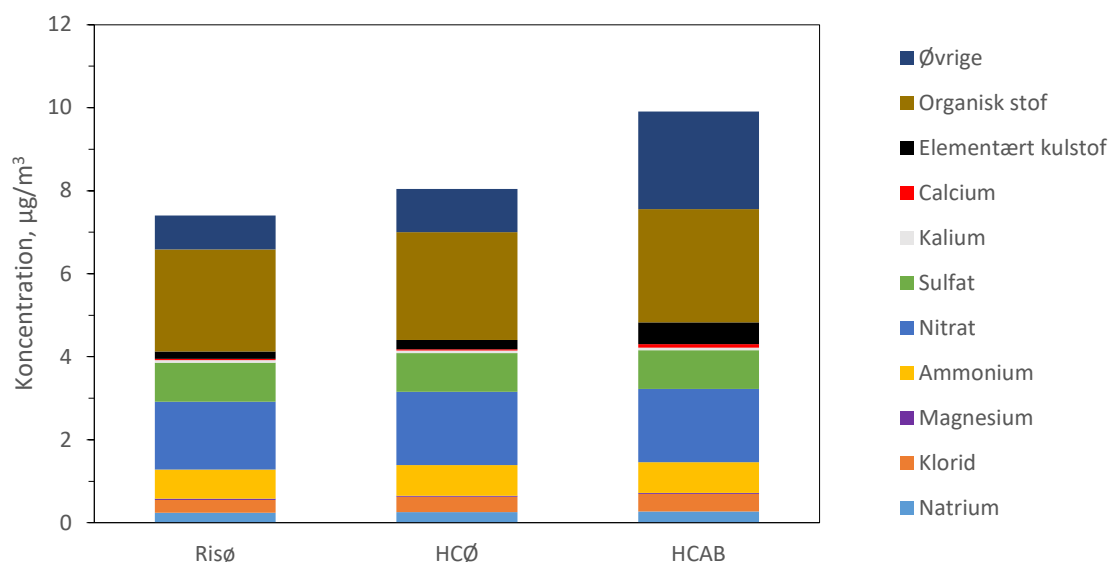
De uorganiske ioner i de fine partikler bliver overvåget med målinger foretaget på landbaggrundsmålestationen ved Risø. Frem til og med 2016 blev der også foretaget tilsvarende målinger ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard. Der var kun lille forskel mellem koncentrationerne målt på de to 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 Institutet). Estimerne baseres på resultaterne fra perioden, hvor der var målinger på både Risø og H.C. Andersens Boulevard.

11.2 Status for 2022

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 Institutet 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 43% 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 (2-3%), mens det udgør 5% 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 28% 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 PM_{10} , 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 Institutttet og gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard i 2022. 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.

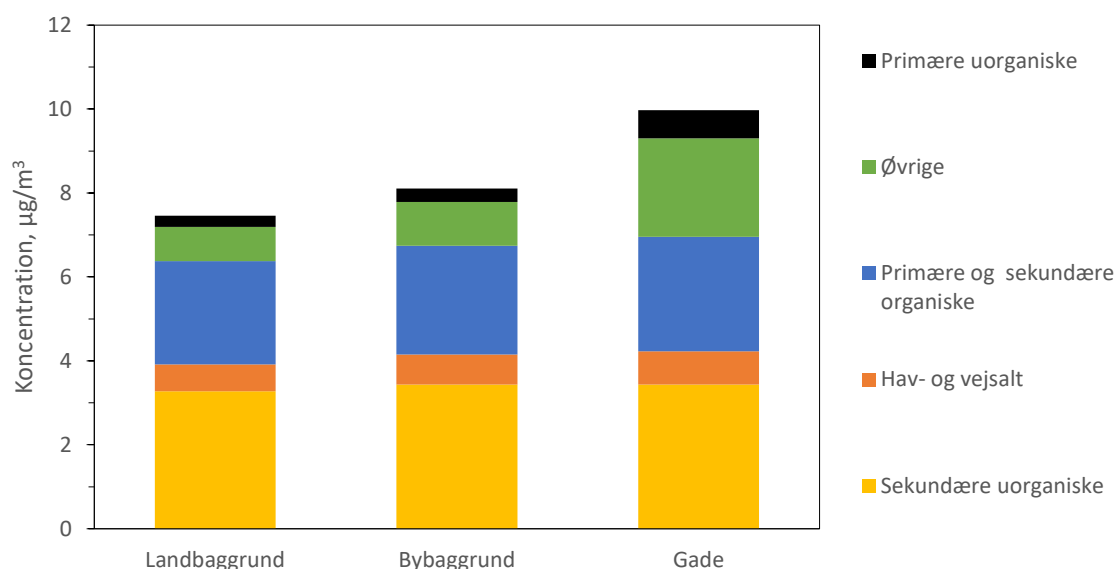
Tabel 11.1. Årsmiddelkoncentrationer for de kemiske komponenter i de fine partikler (PM_{2,5}) ved landbaggrundsmålestationen ved Risø, bybaggrundsmålestationen på H.C. Ørsted Institutttet og gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard i 2022. Til sammenligning vises den samlede mængde fine partikler (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. Dækningsgraden er for alle målte koncentrationer præsenteret i denne og resten af tabellerne i afsnit 11 er over 85%, og der er derfor tilstrækkelig god dækningsgrad, idet EU's krav er mindst 85%.

	Landbaggrund Risø µg/m ³	Bybaggrund HCØ µg/m ³	Gade HCAB µg/m ³
PM _{2,5}	7,4	8,0	9,9
Natrium	0,24	0,25	0,27
Klorid	0,31	0,37	0,42
Magnesium	0,03	0,03	0,03
Ammonium	0,70	0,74	0,74
Nitrit	1,6	1,8	1,8
Sulfat	0,94	0,93	0,93
Kalium	0,06	0,06	0,06
Calcium	0,03	0,03	0,08
Elementært kulstof	0,18	0,23	0,52
Organisk stof	2,5	2,6	2,7
Øvrige	0,81	1,0	2,3

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 (35-44%; 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 (8-9%), de primære og sekundære organiske partikelkomponenter (28-33%) og gruppen af øvrige partikelkomponenter (11-24%) 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.

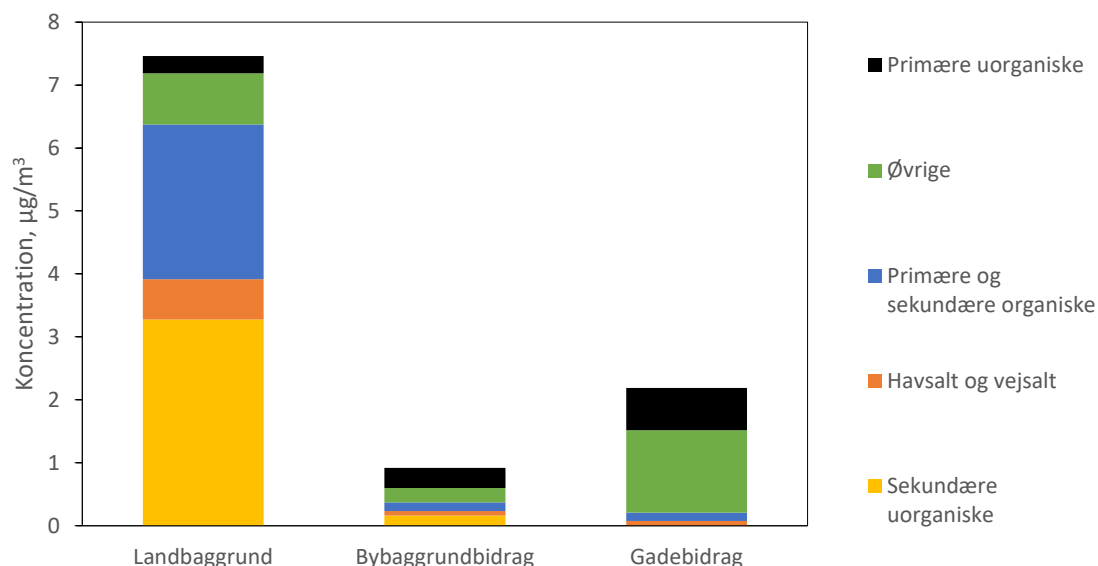


Figur 11.2. Årsmiddelkoncentrationer for de kemiske komponenter opdelt i grupper ved landbaggrundsmålestationen ved Risø, bybaggrundsmålestationen på H.C. Ørsted Institutttet og gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard i 2022. For bybaggrundsmålestationen og gademålestationen er data for en stor 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 Institutttet og gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard i 2022. Til sammenligning vises også den samlede mængde fine artikler (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	9,9
Hav- og vejsalt	0,64	0,71	0,79
Primære uorganiske	0,27	0,32	0,67
Sekundære uorganiske	3,3	3,4	3,4
Primære og sekundære organiske	2,5	2,6	2,7
Øvrige	0,8	1,0	2,3

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 75% fra landbaggrund, mens bybaggrund og gadebidrag står for henholdsvis omkring 6% og 19%. 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 samme 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 19% af gadebidraget til partikelforureningen ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard.



Figur 11.3. Årsmiddelkoncentrationer i 2022 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 Institutet) 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 2022 på niveau med 2021 (kapitel 7) selv om der er sket et mindre fald i koncentrationen ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard. Men der er noget forskel mellem 2021 og 2022 for de forskellige kemiske komponenter. Størst ændring ses for hav- og vejsalt, som er steget med omkring 32%, hvilket skal ses i lyset af at koncentrationerne var faldet med omkring 25% fra 2020 til 2021. Der ses et uændret niveau for de primære uorganiske komponenter (hovedsageligt elementært kulstof), mens de sekundære uorganiske ioner er faldet en smule (omkring 3%). De primære og sekundære uorganiske og de øvrige kemiske komponenter er uændret fra 2021 til 2022, bortset fra at der er sket et fald i de øvrige komponenter ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard. Ændringerne fra 2021 til 2022 skyldes hovedsageligt variationerne i de meteorologiske forhold fra år til år.

12. Helbredseffekter og samfundsmæssige omkostninger relateret til luftforurening

Ifølge WHO er luftforurening 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). Anden 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 2022. Beregningerne er gennemført for 2022 på basis af meteorologiske data for 2022, udledningsdata for 2021 for Danmark og udledningsdata for 2020 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 middellevelevetid 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% for Danmark eller 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 samfundsmæssige 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 udledningssektorer 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 bidraget fra en sektor, 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.

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 EVA_{v7.1} modelsystemet, som muliggør adskillelse af helbredseffekterne og relaterede samfundsmæssige 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 samfundsmæssige omkostninger. Usikkerheder er diskuteret i afsnit 12.5.

Helbredseffekter, som følge af luftforurening, er primært associeret med eksponering for fine partikler (PM_{2,5}), kvælstofdioxid, ozon og svovldioxid. Af disse komponenter, er PM_{2,5}, kvælstofdioxid og ozon, 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 for helbredseffekter 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 den mulige nedre tærskelværdi for $\text{PM}_{2,5}$, 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 de seneste års afrapporteringer har vi indført en mere grundlæggende 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 2020-2022 har ikke givet anledning til at ændre på dette tal. I takt med, at

modellerne bliver bedre, og derfor kommer nærmere på at lukke masegabet, 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}.

I de seneste år, er der sket en løbende revision og udvikling af SPREAD modellen, der benyttes til at beregne de emissioner, der bruges i DEHM/UBM for Danmark. Ændringer i SPREAD har givet anledning til, at en rekalkulering af UBM har været nødvendig. Dette har haft størst betydning for beregning af NO₂, der før kalibreringen i UBM viste en tendens til overestimering i forhold til målingerne.

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 2020-2022. 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. Dette tal er opdateret fra de foregående års værdi (10,6, se Brandt et al., 2013a; b) på baggrund af levetidstabeller opdateret med mortalitetsdata fra Danmarks Statistik for 2019.

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 2020-2022 for hele Danmark opdelt på luftforureningskomponenterne svovldioxid (SO₂), ozon (O₃), kvælstofdioxid (NO₂), pPPM_{2,5} (menneskeskabt primær PM_{2,5}), øvrig PM_{2,5}, og PM_{2,5} (sum af primær og øvrig PM_{2,5}).

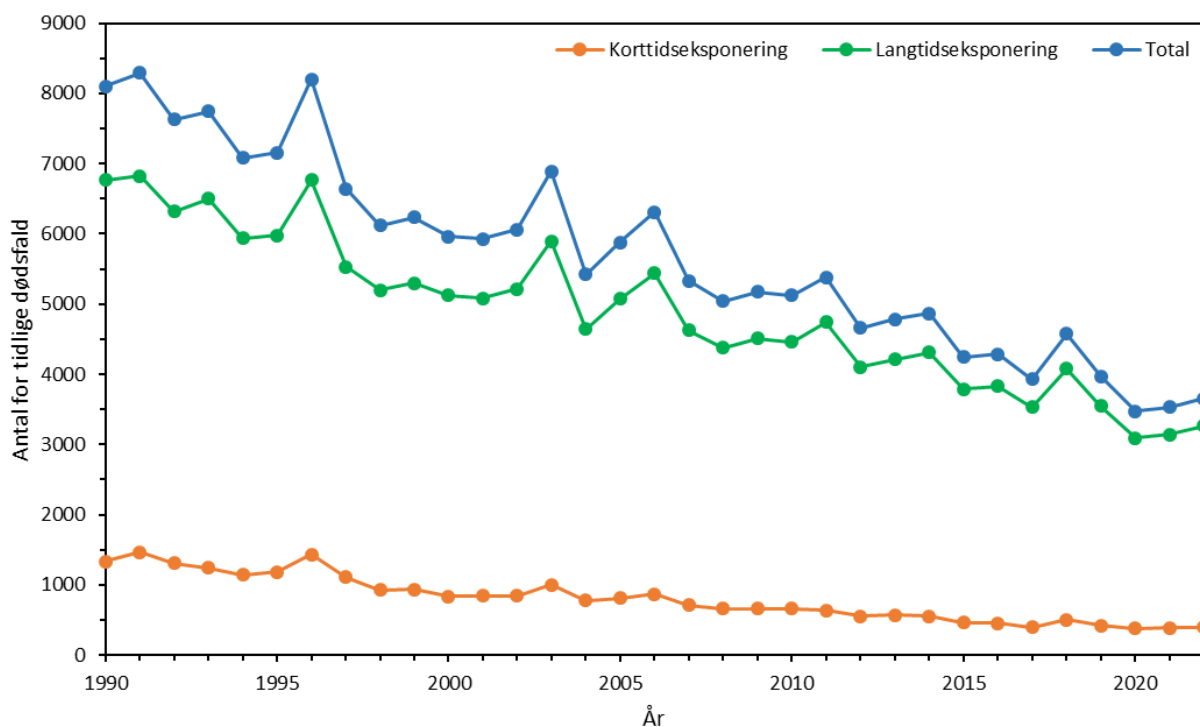
Helbredseffekt	Antal tilfælde						Total*
	SO ₂	O ₃	NO ₂	PPM _{2,5}	Øvrig PM _{2,5}	PM _{2,5}	
For tidlig død (korttidseksponering)	18	90	2	48	228	277	386
For tidlig død (langtidseksponering)			2	551	2.610	3.170	3.170
For tidlig død (total)	18	90	4	600	2.840	3.440	3.550
Hospitalsindlæggelser, åndedrætsbesvær		136	1.150	231	1.090	1.320	2.600
Hospitalsindlæggelser, hjertekarsygdomme		445		161	760	920	1.370
Hoste børn				52	246	298	298
Kronisk bronkitis voksne				474	2.230	2.710	2.710
Kronisk bronkitis børn				1.650	11.700	13.400	13.400
Tabte arbejdsdage				30.000	142.000	172.000	172.000
Dage med restriktioner i aktivitet				373.000	1.760.000	2.130.000	2.130.000
Dage med mindre restriktioner i aktivitet		397.000					397.000
Lungekræft				75	357	432	432
Spædbarnsdød					0,1		0,1

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

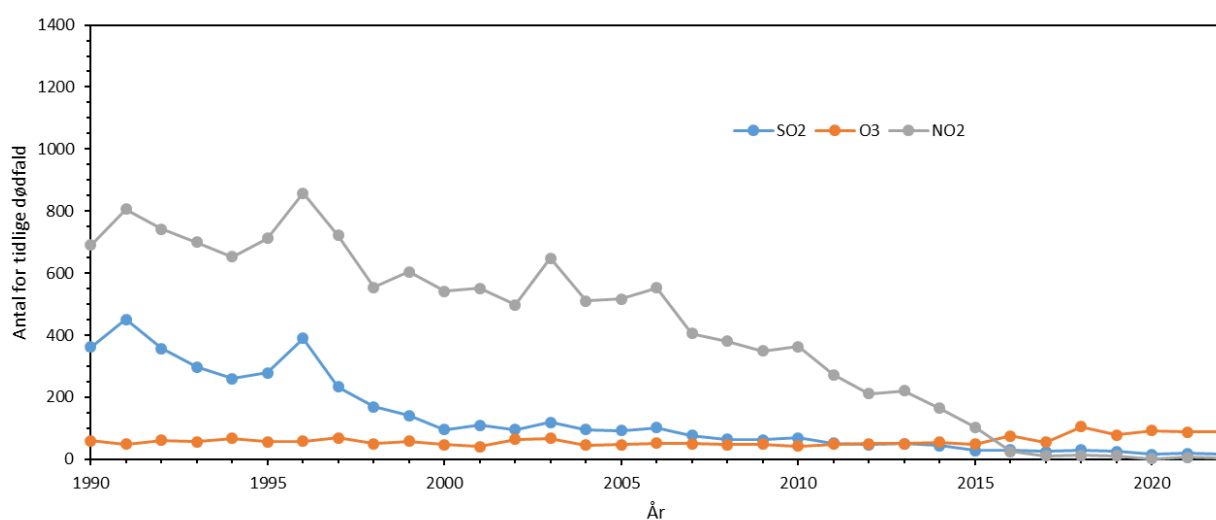
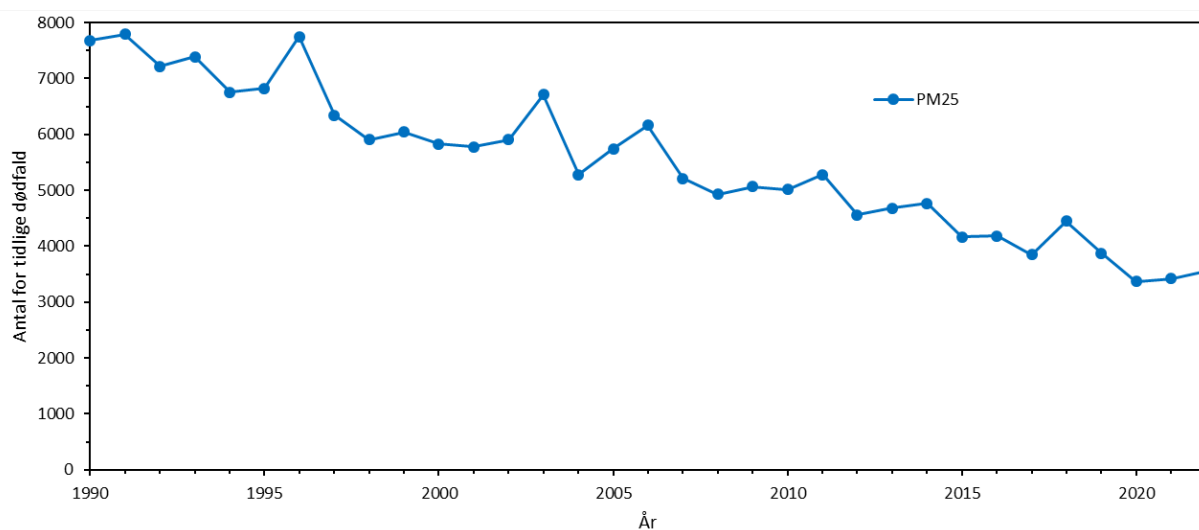
Det samlede antal tilfælde af for tidlig død per år, som følge af luftforurening, beregnes til omkring 3.550 tilfælde i Danmark som gennemsnit for 2020-2022 (Tabel 12.1). Helbredseffekten af eksponering for PM_{2,5} resulterer i omkring 3.440 tilfælde af for tidlig død, kvælstofdioxid resulterer i omkring 4 tilfælde af for tidlig død, eksponering for ozon i omkring 90 tilfælde og eksponering for svovldioxid i omkring 18 tilfælde af for tidlig død. 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 96,9% af tilfældene af for tidlig død, ozon for omkring 2,5%, svovldioxid for omkring 0,5% og NO₂ for omkring 0,1% som gennemsnit over de tre år fra 2020-2022. Der er sket en udvikling i forhold til tidligere år, hvor kvælstofdioxid betyder mindre, fordi de nye retningslinjer fra WHO indebærer en tærskelværdi på 10 µg/m³ på både korttids- og langtidseksponeringen i relation til for tidlige dødsfald. Efterhånden som koncentrationerne af NO₂ nærmer sig tærskelværdien pga. reduktioner i udslip, vil antallet af for tidlige dødsfald nærme sig nul. Desuden er der sket en recalibrering af UBM modellen pga. opdaterede SPREAD-emissioner, som har bevirket et yderligere fald i NO₂-koncentrationerne, så NO₂ nu overvejende er under tærskelværdien i bybaggrunden.



Figur 12.1. Det samlede antal tilfælde af for tidlige dødsfald per år i perioden 1990-2022, 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 korttidseksponering. Beregningerne er foretaget med EVA7.1.



Figur 12.2. Antal tilfælde af for tidlige dødsfald per år i perioden 1990-2022, fordelt på luftforureningskomponenterne PM_{2,5} (øverst) og kvælstofdioxid (NO₂), ozon (O₃) og svovldioxid (SO₂) (nederst) i Danmark. Beregningerne er foretaget med EVA7.1.

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 1990-2022 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 3.660 tilfælde per år i 2022. Dette svarer til en reduktion på omkring 55%. 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. 3.450 tilfælde) dels pga. covid-19-restriktionerne, både i Danmark

og i Europa og dels pga. 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. Betydningen af for tidlige dødsfald som følge af korttidseksponering er blevet mindre i den opdaterede EVA7.1, da der nu er tærskelværdi knyttet til korttidseksponering af NO₂.

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 2022 er ansvarlige for omkring 2.990 for tidlige dødsfald (svarende til omkring 82%), mens de danske kilder er ansvarlige for omkring 672 for tidlige dødsfald (18%). Udlandets bidrag på omkring 2.990 for tidlige dødsfald er næsten uændret i forhold til året før, hvor tallet var 2.910. Bidraget fra danske kilder er faldet markant i 2022 i forhold til 2021, hvor danske kilder var ansvarlige for omkring 1.000 for tidlige dødsfald. Faldet fra 2021 til 2022 skyldes formentligt særlige meteorologiske forhold i 2022.

De danske udledning bidrager ikke alene til helbredseffekter i Danmark, men også til omkring 1.860 for tidlige dødsfald årligt i de øvrige europæiske lande i 2022. "Import" af helbredseffekter relateret til luftforurening er derfor omkring 38% større end "eksport" fra Danmark til de øvrige lande. De danske udledningers bidrag til udlandet er faldet fra ca. 2.340 i 2021 til 1.860 i 2022. Af resultaterne i tabellen ses også, at de danske udledning forårsager omkring 64% færre tilfælde af for tidlige dødsfald i Danmark (omkring 672) i forhold til, hvad de danske udledning forårsager i udlandet (omkring 1.860) 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 2022 (tallene er afrundet).

Bidrag	Antal tilfælde af for tidlig død	% af samlet
Samlet luftforurening i Danmark	3.660	100
Udlandets bidrag til Danmark	2.990	82
Danmarks bidrag til Danmark	672	18
Danmarks bidrag til Europa inkl. Danmark	2.530	100
Danmarks bidrag til Europa ekskl. Danmark	1.860	73

12.2 Status for luftforureningens samfundsmæssige omkostninger som følge af helbredseffekter

Tabel 12.3 viser de samlede årlige samfundsmæssige omkostninger som følge af helbredseffekter af luftforureningen i Danmark i 2022.

De samlede helbredsrelaterede omkostninger relateret til luftforurening i Danmark er estimeret til omkring 58 milliarder kr. i 2022, hvilket er omkring 5 milliarder kr. mindre end rapporteret for 2021. Den økonomiske værdisætning af forskellige helbredseffekter er her baseret på Andersen et al. (2019) og angivet i 2016-priser.

Tabel 12.3 viser også fordelingen af de helbredsrelaterede omkostninger på bidraget fra henholdsvis udledning i udlandet og udledning i Danmark.

Bidraget fra udlandet estimeres til 48 milliarder kr. (82% af de samlede helbredsrelaterede omkostninger i Danmark), mens bidraget fra danske udledninger udgør omkring 11 milliarder kr. indenfor Danmark (18%). Bidraget fra danske udledninger til luftforureningens helbredsrelaterede omkostninger i Europa eksklusiv Danmark er beregnet til omkring 30 milliarder kr., sådan at ca. ¾ dele af omkostningerne relateret til danske landbaserede kilder havner i udlandet.

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 2022.

Bidrag	Mia. DKK	% af total
Samlet luftforurening i Danmark	58	100
Udlandets bidrag til Danmark	48	82
Danmarks bidrag til Danmark	11	18
Danmarks bidrag til Europa inkl. Danmark	41	100
Danmarks bidrag til Europa ekskl. Danmark	30	74

12.3 Kilder til helbredseffekter af luftforureningen i Danmark i 2022

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 2022, hvor tabel 12.1 angiver data for gennemsnittet af 2020-2022. Samlet set giver luftforureningen anledning til omkring 3.660 for tidlige dødsfald i 2022, med PM_{2,5} som den største bidragsyder (omkring 3.550 for tidlige dødsfald) og ozon som den næststørste (omkring 89 for tidlige dødsfald). Kvælstofdioxid bidrager kun med omkring 2 for tidlige dødsfald og svovldioxid med omkring 18 for tidlige dødsfald. Som det ses i figur 12.2, er antallet af for tidlige dødsfald som følge af eksponering til kvælstofdioxid og svovldioxid faldet signifikant i perioden 1990-2022.

Tabel 12.4. Antal tilfælde af helbredseffekter i 2022 som følge af luftforureningen i Danmark. Beregningerne er udført med EVA7.1 modelsystemet for hele Danmark opdelt på luftforureningskomponenterne svovldioxid (SO₂), ozon (O₃), kvælstofdioxid (NO₂), primær PM_{2,5}, øvrig PM_{2,5}, og PM_{2,5} (sum af primær og øvrig PM_{2,5}). (Tallene er afrundede).

Helbredseffekt	Antal tilfælde						Total
	SO ₂	O ₃	NO ₂	PPM _{2,5}	Øvrig PM _{2,5}	PM _{2,5}	
For tidlig død (korttidseksposering)	18	89	2	49	236	285	394
For tidlig død (langtidseksposering)			2	562	2.700	3.260	3.260
For tidlig død (total)	18	89	4	612	2.935	3.550	3.660
Hospitalsindlæggelser, åndedræts-		135	1.150	235	1.120	1.360	2.650
Hospitalsindlæggelser, hjerte-		441		165	785	950	1.390
Hoste børn				53	254	307	307
Kronisk bronkitis voksne				484	2.310	2.790	2.790
Kronisk bronkitis børn				1.690	12.300	13.900	13.900
Tabte arbejdsdage				30.500	147.000	177.000	177.000
Dage med restriktioner i aktivitet				381.000	1.810.000	2.190.000	2.190.000
Dage med mindre restriktioner i aktivitet		395000		0	0	0	395.000
Lungekræft				77	369	446	446
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 2022 opdelt på SNAP-kategorier.

Danske kilder bidrager med i alt omkring 672 for tidlige dødsfald, hvoraf ikke-industriell forbrænding bidrager med ca. 254 for tidlige dødsfald, landbrug med ca. 173 for tidlige dødsfald og vejtrafik med ca. 110 for tidlige dødsfald, heraf ca. halvdelen fra udstødning og ca. halvdelen 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-industriell forbrænding fra husholdninger i Danmark, der er den største bidragsyder. Danske kilder giver desuden anledning til over 400.000 sygedage (dage med restriktioner i aktiviteter).

Udenlandske kilder bidrager med i alt ca. 2.990 for tidlige dødsfald, hvoraf naturlige kilder og international skibsfart bidrager med henholdsvis omkring 1080 og 488 for tidlige dødsfald. Landbrugssektoren i Europa (uden for Danmark) bidrager med omkring 572 for tidlige dødsfald i Danmark og vejtrafik bidrager med omkring 345, energiindustrien med ca. 165, ikke-industriell forbrænding med ca. 282, og fremstillingsvirksomhed og byggeri med ca. 242 for tidlige dødsfald i Danmark. Ikke-vejgående transport fra udenlandske kilder bidrager også væsentligt med omkring 110 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 knapt 20% ses afhængigt af helbredseffekt. Især for helbredseffekter relateret til NO₂ (f.eks. for tidlig død som følge af korttidseksponering) 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 i 2022.

Ikke-industriell forbrænding fra husholdninger (primært boligopvarmning med fast brændsel som træ, træpiller og halm, sekundært boligopvarmning med olie og gas) i Danmark bidrager mest til antallet af for tidlige dødsfald (ca. 6,2% ud af det samlede antal fra alle danske og udenlandske kilder), efterfulgt af landbrug med 4,2% og vejtransport med 2,7%. 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 ca. det samme som ikke-udstødningsdelen. Væsentlige bidragsydere er desuden ikke-vejgående transport med ca. 0,8% og kraftværker med ca. 1%. For dage med mindre restriktioner i aktivitet, er det vejtransport, der bidrager mest (-3,7%) dernæst ikke-vejgående transport (-1,2%) og kraftværker (-1%). 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.

Tabel 12.5. Danske og udenlandske kilders bidrag til helbredseffekter i Danmark i 2022 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)	Totalt antal for tidlige dødsfald (PM _{2,5} , SO ₂ , NO ₂ , O ₃)	Hospitalsindlæggelser, ånde- drætsbesvær (PM _{2,5} , NO ₂ , O ₃)	Hospitalsindlæggelser, hjerte- sygdomme (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	11	31	42	97	3	3	23	76	1430	18000	-4520	4	0
201	Ikke-industriel forbrænding <i>Handel og service</i>	1	5	6	10	1	0	4	13	251	3170	-373	1	0
202	Ikke-industriel forbrænding <i>Husholdninger</i>	19	204	224	114	58	19	175	612	11100	138000	-1850	28	0
203	Ikke-industriel forbrænding <i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	2	22	24	13	6	2	19	66	1200	14800	-50	3	0
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	6	13	19	36	2	1	10	33	652	8170	-1370	2	0
4	Industrielle processer	4	17	21	8	7	2	15	51	948	11900	1210	2	0
5	Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	1	3	4	2	1	0	3	9	184	2240	374	0	0
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	2	16	18	8	7	2	14	48	870	11300	1920	2	0
701-706	Vejtransport <i>Udstødning</i>	5	52	57	241	-4	4	40	130	2510	31400	-17900	6	0
707-708	Vejtransport <i>Ikke-udstødning</i>	4	48	53	21	15	5	43	149	2630	33600	465	7	0
8	Andre mobile kilder	4	30	34	90	2	3	24	79	1490	18600	-5880	4	0
9	Affald	4	12	16	7	4	1	11	35	669	8470	282	2	0
10	Landbrug	16	157	173	164	51	15	133	396	8460	105000	5800	21	0
Udenlandske kilder														
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	16	149	165	84	50	14	127	396	8110	100000	6080	20	0
2	Ikke-industriel forbrænding	26	255	282	127	90	24	218	725	13900	172000	14300	35	0
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	25	218	242	122	81	20	186	574	11800	146000	16000	30	0
4	Industrielle processer	7	47	53	21	27	4	40	137	2530	31200	11800	6	0
5	Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	3	14	17	8	13	1	12	38	778	9620	7710	2	0
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	9	15	8	29	1	7	25	473	5840	23700	1	0
7	Vejtransport	37	308	345	208	139	29	263	834	16700	207000	44800	42	0
8	Andre mobile kilder	12	98	110	68	44	9	84	269	5340	65900	13700	13	0
9	Affald	2	21	23	9	9	2	18	58	1127	13900	2610	3	0
10	Landbrug	55	517	572	266	200	49	442	1330	28100	348000	45200	71	0
-	International skibstransport	47	441	488	475	135	41	372	1190	23700	292000	7110	60	0
-	Naturlige kilder	149	934	1083	560	603	88	797	7510	50700	627000	299000	128	0
	Sum alle kilder	464	3630	4100	2770	1580	340	3090	14800	196000	2430000	472000	493	0,3
	Total luftforurening	400	3270	3660	2650	1390	307	2790	13900	177000	2190000	395000	446	0,3
	Difference i % mellem sum af sektorer og total luftforurening	16	11	12	4	13	11	11	6	11	11	19	11	0

Tabel 12.6. Danske og udenlandske kilders bidrag til helbredseffekter i Danmark i 2022 fordelt på udledningssektorer i %.

SNAP	Emissionssektor	For tidlige dødsfald fra korttids-eksponering (PM _{2,5} , SO ₂ , NO ₂ , O ₃)	For tidlige dødsfald fra langtids-eksponering (PM _{2,5} , NO ₂)	Totalt antal for tidlige dødsfald (PM _{2,5} , SO ₂ , NO ₂ , O ₃)	Hospitalsindlæggelser, åndedrætsbesvær (PM _{2,5} , NO ₂ , O ₃)	Hospitalsindlæggelser, 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	2,4	0,9	1,0	3,5	0,2	0,7	0,7	0,5	0,7	0,7	-1,0	0,7	0,0
201	Ikke-industriel forbrænding	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-0,1	0,1	0,0
	<i>Handel og service</i>													
202	Ikke-industriel forbrænding	4,2	5,6	5,5	4,1	3,7	5,7	5,7	4,1	5,6	5,7	-0,4	5,6	0,0
	<i>Husholdninger</i>													
203	Ikke-industriel forbrænding	0,5	0,6	0,6	0,5	0,4	0,6	0,6	0,4	0,6	0,6	0,0	0,6	0,0
	<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>													
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	1,3	0,4	0,5	1,3	0,1	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	-0,3	0,3	0,0
4	Industrielle processer	0,8	0,5	0,5	0,3	0,4	0,5	0,5	0,3	0,5	0,5	0,3	0,5	0,0
5	Udvinning, 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	0,4	0,4	0,3	0,4	0,5	0,5	0,3	0,4	0,5	0,4	0,4	0,0
701-706	Vejtransport	1,2	1,4	1,4	8,7	-0,2	1,3	1,3	0,9	1,3	1,3	-3,8	1,3	0,0
	<i>Udstødning</i>													
707-708	Vejtransport	1,0	1,3	1,3	0,8	1,0	1,4	1,4	1,0	1,3	1,4	0,1	1,3	0,0
	<i>Ikke-udstødning</i>													
8	Andre mobile kilder	0,8	0,8	0,8	3,3	0,1	0,8	0,8	0,5	0,8	0,8	-1,2	0,8	0,0
9	Affald	0,8	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,1	0,3	0,0
10	Landbrug	3,4	4,3	4,2	5,9	3,3	4,3	4,3	2,7	4,3	4,3	1,2	4,3	0,0
Udenlandske kilder														
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	3,4	4,1	4,0	3,0	3,2	4,1	4,1	2,7	4,1	4,1	1,3	4,1	11,1
2	Ikke-industriel forbrænding	5,7	7,0	6,9	4,6	5,7	7,1	7,1	4,9	7,1	7,1	3,0	7,1	11,1
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	5,3	6,0	5,9	4,4	5,1	6,0	6,0	3,9	6,0	6,0	3,4	6,0	11,1
4	Industrielle processer	1,4	1,3	1,3	0,7	1,7	1,3	1,3	0,9	1,3	1,3	2,5	1,3	11,1
5	Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	0,7	0,4	0,4	0,3	0,8	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	1,6	0,4	0,0
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	1,3	0,2	0,4	0,3	1,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	5,0	0,2	0,0
7	Vejtransport	8,0	8,5	8,4	7,5	8,8	8,5	8,5	5,6	8,5	8,5	9,5	8,5	11,1
8	Andre mobile kilder	2,5	2,7	2,7	2,5	2,8	2,7	2,7	1,8	2,7	2,7	2,9	2,7	11,1
9	Affald	0,5	0,6	0,6	0,3	0,6	0,6	0,6	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	11,1
10	Landbrug	11,9	14,2	14,0	9,6	12,7	14,3	14,3	9,0	14,3	14,3	9,6	14,3	11,1
-	International skibstransport	10,1	12,2	11,9	17,2	8,6	12,0	12,0	8,0	12,1	12,0	1,5	12,1	0,0
-	Naturlige kilder	32,1	25,7	26,4	20,2	38,3	25,8	25,8	50,7	25,9	25,8	63,4	25,9	11,1
Sum alle kilder		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Der ses desuden et bidrag på ca. 8,7% 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 -0,2%). Største bidragsyder til hospitalsindlæggelser for hjertekarsygdomme er ikke-industriel forbrænding med ca. 4,1%. 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.

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 20% til hospitalsindlæggelser grundet åndedrætsbesvær og med omkring 63% 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% til antallet af for tidlige dødsfald og naturlige kilder med omkring 26%. Landbrug i udlandet bidrager med ca. 14% til antallet af for tidlige dødsfald i Danmark og vejtransport ligger på omkring 8,4% i bidrag til helbredseffekter i Danmark. Endelig er bidraget fra boligopvarmning og fremstillingsprocesser nogenlunde lige stort og i størrelsesordenen 6-7%.

12.4 Danske og udenlandske kilder til omkostningerne fra luftforureningen i Danmark 2022

Kilderne til samfundsmæssige omkostninger fra luftforureningen i Danmark er beregnet for 2022 ved hjælp af EVA_v7.1. Der er også her anvendt samme modelopsætning og økonomisk værdisætning, som i forbindelse med NO-VANA-rapporteringen for 2021 (Ellermann et al., 2022; Andersen et al., 2019). Beregningerne med EVA_v7.1 modelsystemet er gennemført, så det er muligt at adskille de samfundsmæssige omkostninger fra danske hhv. europæiske kilder.

Tabel 12.7 viser de samlede samfundsmæssige omkostninger fordelt på de forskellige luftforureningskomponenter, som giver anledning til helbredseffekter i Danmark i 2022. Det ses, at de samlede omkostninger, som følge af luftforureningen i Danmark fra såvel udenlandske som danske kilder, er på omkring 58 milliarder kr. i 2022. For tidlige dødsfald som følge af korttids- og langtidseksposering tegner sig for den største del af omkostningen, omkring 54 milliarder kr. Sygedage (dage med restriktioner i aktivitet) tegner sig for ca. 2,4 milliarder kr. og kronisk bronkitis (børn) for ca. 826 mio. kr.

Tabel 12.7. De samlede samfundsmæssige omkostninger i 2022 fra luftforureningen med 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 i Danmark dvs. al luftforurening både fra danske og udenlandske kilder (mio. kr., 2016 priser).

Omkostninger (mio. kr.)							
Helbredseffekt	SO ₂	O ₃	NO ₂	PPM _{2,5}	Øvrig PM _{2,5}	PM _{2,5}	Total
For tidlig død (korttidseksposering)	567	2.820	63	1.560	7.440	9.000	12.500
For tidlig død (langtidseksposering)			27	7.140	34.300	41.400	41.500
For tidlig død (total)	567	2.820	90	8.700	41.700	50.400	53.900
Hospitalsindlæggelser, åndedrætsbesvær		10	85	17	83	101	196
Hospitalsindlæggelser, hjertekarsygdomme		52		20	94	113	165
Hoste børn				1	3	3	3
Kronisk bronkitis børn				142	683	826	826
Tabte arbejdsdage				62	298	360	360
Dage med restriktioner i aktivitet				420	2.000	2.420	2.420
Dage med mindre restriktioner i aktivitet		230		0	0	0	230
Lungekræft				42	200	241	241
Spædbarnsdød				1	3	4	4
Total	567	3.110	175	9.410	45.100	54.500	58.400

Bidrag fra danske og udenlandske kilder til luftforureningens samfundsmæssige omkostninger i Danmark

Tabel 12.8 viser fordelingen af bidraget til luftforureningens samfundsmæssige 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. 11 mia. kr. Heraf bidrager ikke-industriel forbrænding med ca. 3,9 mia. kr., vejtransport med ca. 1,7 mia. kr. og landbrug med ca. 2,7 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. 740 mio. kr., og primært udledte partikler og øvrige partikler fra danske kilder bidrager ca. lige meget (henholdsvis 4,6 og 5,3 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 ca. 527 mio. 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-vejsgående transport og energisektoren, der bidrager, men negativt, sådan at kilderne (ved udledning af kvælstofoxider) bidrager til at mindske ozonkoncentrationerne. 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 -171 mio. kr. fra alle danske kilder) opvejer dog langt fra omkostningerne fra kvælstofdioxid (samlet ca. 738 mio. kr. fra alle danske kilder).

Tabel 12.8. De samlede omkostninger i 2022 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), primær PM_{2,5} og øvrig PM_{2,5}, PM_{2,5} (sum af primær og øvrig PM_{2,5}). 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	172	-36	208	157	285	442	786
201	Ikke-industriel forbrænding <i>Handel og service</i>	5	-3	13	44	33	77	92
202	Ikke-industriel forbrænding <i>Husholdninger</i>	38	-15	38	2.410	994	3.400	3.470
203	Ikke-industriel forbrænding <i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	10	0	3	251	117	368	380
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	137	-11	49	48	153	201	375
4	Industrielle processer	53	9	0	163	129	293	355
5	Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	9	3	0	3	53	56	68
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	4	15	1	191	80	270	291
701-706	Vejtransport <i>Udstødning</i>	6	-140	254	121	653	774	894
707-708	Vejtransport <i>Ikke-udstødning</i>	0	4	0	582	231	814	817
8	Andre mobile kilder	13	-46	110	197	262	459	535
9	Affald	82	2	4	102	104	207	296
10	Landbrug	-1	46	57	358	2.240	2.600	2.700
Udenlandske kilder								
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	39	48	1	91	2.400	2.490	2.580
2	Ikke-industriel forbrænding	24	113	1	1.880	2.390	4.270	4.410
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	63	126	2	0	3.640	3.640	3.830
4	Industrielle processer	-1	93	0	537	240	777	869
5	Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	3	61	0	28	211	239	303
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	0	187	0	67	79	145	332
7	Vejtransport	3	353	5	388	4.750	5.140	5.500
8	Andre mobile kilder	1	108	2	202	1.440	1.640	1.750
9	Affald	0	21	0	148	198	346	367
10	Landbrug	-10	356	3	245	8.400	8.640	8.990
-	International skibstransport	59	56	257	297	6.980	7.280	7.650
-	Naturlige kilder	-3	2.360	5	456	15.100	15.600	18.000
Sum alle kilder		708	3.710	1.010	9.000	51.300	60.300	65.700

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. 2,4 mia. kr. Hertil skal nævnes, at ozon kan have en relativt lang levetid i atmosfæren (op til flere 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 275 mio. kr., hvor den største enkelte bidragsyder er international skibstrafik med ca. 257 mio. kr. Bidraget fra de primært udledte partikler fra udlandet er samlet omkring 4,3 mia. kr., hvor de største kilder er ikke-industriel forbrænding med omkring 1,9 mia. kr., international skibstrafik med ca. 297 mio. kr., industrielle processer med omkring 537 mio. kr. og naturlige kilder med ca. 456 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. 8,4 mia. kr. til luftforureningens omkostninger i Danmark og international skibstrafik med omkring 7 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. 28,9 mia. kr., med størst bidrag fra landbrug (ca. 9 mia. kr.), vejtransport (med ca. 5,5 mia. kr.) og fremstillingsvirksomhed og byggeri (ca. 3,8 mia. kr.) og ikke-industriel forbrænding med ca. 4,4 mia. kr. Derudover bidrager international skibstrafik med omkring 7,6 mia. kr. og de naturlige kilder med ca. 17,9 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 er givet i tabel 12.7. 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 kvælstofdioxid og ozon. Desuden er der en mindre effekt fra det såkaldte Gibb's fænomen (numeriske oscillationer i Eulerske modeller pga. stærke gradienter), som kan have forskellig betydning, afhængigt af om alle sektorer er kørt samlet eller om de sektorerne er kørt enkeltvis. Den store forskel for NO₂ skyldes hovedsageligt tærskelværdien på 10 µg/m³ for NO₂, da reduktion i enkelte sektorer ikke nødvendigvis resulterer i, at koncentrationerne kommer under tærskelværdien, mens det kan gøre det, når alle sektorer reduceres samlet. Derudover, har vi valgt at køre med en simplificeret version af UBM for punktkilderne, i de mange scenarieberegninger i tabel 12.8.

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 energiindustri, der bidrager med ca. 24%, fremstillingsvirksomhed og byggeri, der bidrager med ca. 19%, samt industrielle processer med 7,5% og affaldshåndtering i Danmark, der bidrager med knapt 12%. 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. ca. 27% og ca. 7,8%. For vejtransporten, er bidraget fra udledningerne, der ikke er relateret direkte til udstødning (dæk-, bremse- og vejslid) omtrent fem gange så stort, som bidraget fra udstødning. Indenfor øvrig PM_{2,5} bidrager landbrug med omkring 4,4%, ikke-industriel forbrænding med ca. 2,2% og vejtransport med ca. 1,7%. Lægges bidraget fra de for-

skellige kemiske stoffer sammen (i total), ses det, at ikke-industriel forbrænding i Danmark bidrager samlet med omkring 6%, mens vejtransport bidrager med ca. 2,6% og landbrug bidrager med ca. 4,1% ud af de totale omkostninger.

Tabel 12.9. De samlede omkostninger i 2022 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), primær PPM_{2,5} 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	24,2	-1,0	20,5	1,8	0,6	0,7	1,2
201	Ikke-industriel forbrænding							
	<i>Handel og service</i>	0,7	-0,1	1,2	0,5	0,1	0,1	0,1
202	Ikke-industriel forbrænding							
	<i>Husholdninger</i>	5,3	-0,4	3,8	26,9	1,9	5,6	5,3
203	Ikke-industriel forbrænding							
	<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	1,4	0,0	0,3	2,8	0,2	0,6	0,6
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	19,3	-0,3	4,8	0,5	0,3	0,3	0,6
4	Industrielle processer	7,5	0,3	0,0	1,8	0,3	0,5	0,5
5	Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	1,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	0,6	0,4	0,1	2,1	0,2	0,4	0,4
701-706	Vejtransport <i>Udstødning</i>	0,9	-3,8	25,1	1,3	1,3	1,3	1,4
707-708	Vejtransport <i>Ikke-udstødning</i>	0,0	0,1	0,0	6,5	0,5	1,3	1,2
8	Andre mobile kilder	1,8	-1,2	10,9	2,2	0,5	0,8	0,8
9	Affald	11,6	0,1	0,4	1,1	0,2	0,3	0,4
10	Landbrug	-0,1	1,2	5,7	4,0	4,4	4,3	4,1
Udenlandske kilder								
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	5,6	1,3	0,1	1,0	4,7	4,1	3,9
2	Ikke-industriel forbrænding	3,4	3,0	0,1	20,9	4,7	7,1	6,7
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	8,9	3,4	0,2	0,0	7,1	6,0	5,8
4	Industrielle processer	-0,1	2,5	0,0	6,0	0,5	1,3	1,3
5	Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	0,5	1,6	0,0	0,3	0,4	0,4	0,5
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	0,0	5,0	0,0	0,7	0,2	0,2	0,5
7	Vejtransport	0,5	9,5	0,5	4,3	9,3	8,5	8,4
8	Andre mobile kilder	0,2	2,9	0,2	2,3	2,8	2,7	2,7
9	Affald	0,0	0,6	0,0	1,7	0,4	0,6	0,6
10	Landbrug	-1,3	9,6	0,3	2,7	16,4	14,3	13,7
-	International skibstransport	8,4	1,5	25,4	3,3	13,6	12,1	11,6
-	Naturlige kilder	-0,4	63,4	0,5	5,1	29,5	25,9	27,3
	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. 21%, international skibstrafik med ca. 3,3%, industrielle processer med ca. 6% og vejtransport med ca. 4,3%. 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. 30%. Dernæst kommer land-

brug med ca. 16% (som skyldes ammoniakudledninger), international skibs-transport med ca. 14% og vejtransport med ca. 9%. Forbrænding af fossile brændstoffer i energisektoren og fremstillingssektoren, samt ikke-industriell forbrænding, bidrager mellem ca. 4%-7% for hver sektor. Overordnet set, når man kigger på totalen (bidraget fra stofferne lagt sammen) bidrager de naturlige kilder med ca. 27%, landbrug og international skibstransport med hhv. ca. 13,7% og 11,6% og vejtransport med ca. 8,4%.

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 atmosfærisk kemi. Desuden ses der mindre negative værdier for svovldioxid for udenlandske kilder (sektor 4 og 10). Dette skyldes også ikke-lineær atmosfærisk kemi.

12.5 Usikkerhed og perspektiver for 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. Eksponerings-responsfunktionerne i EVA systemet blev opdateret sidste år, baseret på WHO's nye retningslinjer og det gav anledning til 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, og at antallet af for tidlige dødsfald som følge af korttidseksponering for NO_2 vurderes at falde. I dette års afrapportering er antallet af for tidlige dødsfald som følge af NO_2 faldet til et ubetydeligt niveau, hvilket skyldes, at koncentrationer i stort omfang nu ligger tæt på tærskelværdien i bybaggrunden og på landet.

Helbredseffekter fra ozon kommer primært fra eksponering fra høje koncentrationer. Der benyttes 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 ($=64 \mu\text{g}/\text{m}^3$), men da evidensen vurderes til at være moderat, er 35 ppb bevaret som tærskelværdi for ozon.

Nyere danske studier (Hvidtfeldt et al., 2019; Raaschou-Nielsen et al., 2020; 2023; 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, blev der sidste år gennemført sensitivitetsberegninger. Disse beregninger ser udelukkende på antallet af for tidlige dødsfald, som følge af korttids- og langtidseksponering.

Tabel 12.10 viser resultaterne af beregninger af antallet af for tidlige dødsfald i Danmark for 2021 for tre sensitivitetsscenarier (DK-A til AK-C) samt basis-scenariet (Ellermann et al., 2023). 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. 2.000 flere for tidlige dødsfald sammenlignet med basisscenariet. Der er endvidere usikkerhed omkring tærskelværdien, der anvendes for NO₂, da der stadigvæk ikke er mange studier på dette område (resultater ikke inkluderet i sensitivitetberegningerne præsenteret i tabel 12.10).

Tabel 12.10. Antallet af for tidlige dødsfald i Danmark for 2021 (som følge af både korttids- og langtidseksponering) fra sensitivitetberegninger foretaget med ændringer i relativ risiko og tærskelværdi for PM_{2,5}.

Scenario	PM _{2,5} relativ risiko	PM _{2,5} tærskelværdi (µg/m ³)	Antal for tidlige dødsfald
Basis	1,08	0	3.900
DK-A	1,08	2,4	2.600
DK-B	1,12	0	5.800
DK-C	1,12	2,4	3.800

Der mangler fortsat viden om, hvilke dele af partikelforureningen, som forårsager helbredseffekterne. Der anvendes den samme eksponerings-responsfunktion for alle de kemiske PM_{2,5}-komponenter, da det på nuværende tidspunkt stadig er det bedste bud baseret på den tilgængelige 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 dette afhænger af, hvilken procentsats udledningerne bliver reduceret med. Dette skyldes ikke-lineær atmosfærekemi, 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 der 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 NO₂, 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 atmosfærekemiske reaktioner.

DCE følger fortsat løbende med i de videnskabelige landvindinger i relation til vurdering af helbredseffekterne af luftforureningen og implementerer 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 af helbredsrelaterede effekter af luftforureningen.

13. Luftkvalitet og WHO's nye anbefalinger

I september 2021 offentliggjorde WHO nye vejledende retningslinjer 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 for fastlægge retningslinjer for disse komponenter.

Opdateringen har for hovedparten af luftforureningskomponenterne ført til en væsentlig skærpelse af retningslinjerne. Hvor niveauerne for retningslinjerne er blevet væsentligt nedsat. Eneste undtagelse er svovldioxid, hvor WHO fandt, at de videnskabelige resultater viste, at niveauerne for retningslinjerne kunne øges.

I det følgende gives en kort gennemgang af, hvordan luftforureningsniveauet i 2022 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

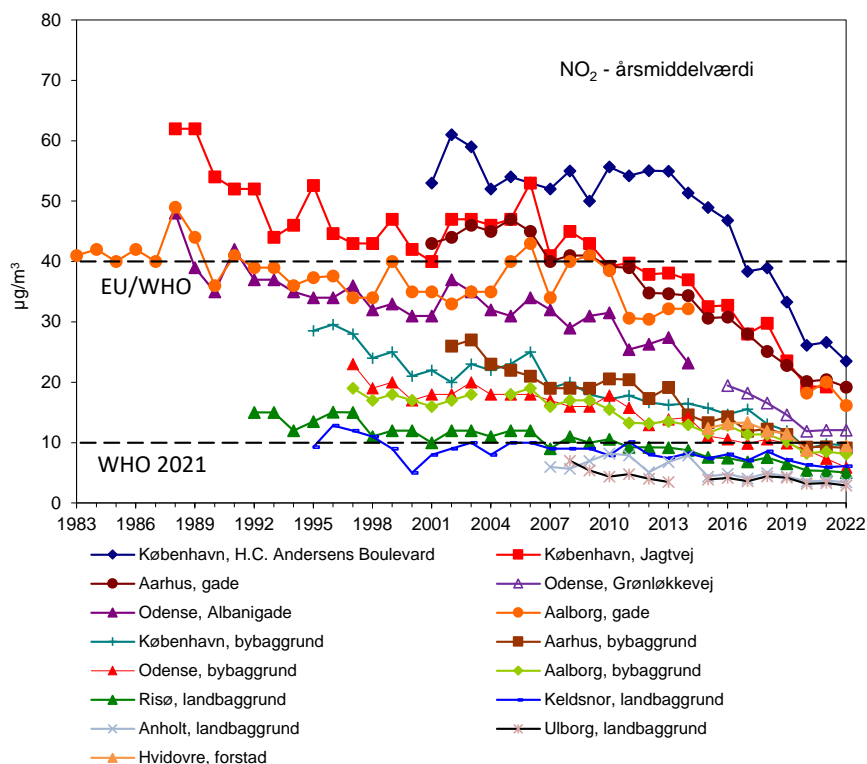
Tabel 13.1 viser, at luftkoncentrationerne af kvælstofdioxid lå under WHO's retningslinjer fra 2006. Den nye retningslinje for årsmiddelkoncentrationen er blevet reduceret til 10 µg/m³ svarende til 25% af den hidtidige retningslinje fra WHO og EU's grænseværdi. Ved alle gademålestationerne ligger årsmiddelkoncentrationerne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

Retningslinjen for den maksimale timemiddelkoncentration forblev uændret, og her ligger koncentrationerne under på alle målestationerne. 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. Til gengæld er der overskridelse på 2-20% for tre af gademålestationerne. Kun ved gademålestationen 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	23	136	53
København, Jagtvej*			
Odense, Grønløkkevej	12	82	36
Aarhus, Banegaardsgade	19	97	47
Aalborg, Vesterbro	16	107	49
<i>Bybaggrund</i>			
København	9,5	88	27
Odense	5,9	64	26
Aarhus	9,1	79	28
Aalborg	8,1	71	28
<i>Forstad</i>			
Hvidovre	9,5	95	39
<i>Landbaggrund</i>			
Anholt	3,4	59	12
Keldsnor	6,1	88	25
Risø	5,0	59	19
Ulborg	2,9	30	9

*Målestationen på Jagtvej, København var midlertidigt lukket i store dele af 2022 grundet omfattende vejarbejde.



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 ($100.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$; WHO, 2021a). Da målingerne er baseret på $\frac{1}{2}$ -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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Maksimal 8-timers middelværdi $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Døgnmiddel 99%-fraktil $\mu\text{g}/\text{m}^3$
WHO 2006	35000	10000	
WHO 2021	35000	10000	4000
<i>Gade</i>			
København, H.C.Andersens Boulevard	1412	829	514
Odense, Grønløkkevej	1599	978	568
Aarhus, Banegaardsgade	867	672	381
Aalborg, Vesterbro	1121	1083	540
<i>Bybaggrund</i>			
København	434	376	374
<i>Landbaggrund</i>			
Risø	585	475	402

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 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO, 2021a). Niveauerne ved målestationerne (Tabel 13.3) lå kun på omkring 25% af den gamle retningslinje, 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 ($500 \mu\text{g}/\text{m}^3$; WHO, 2021a). Da målingerne er baseret på $\frac{1}{2}$ -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 µg/m³
WHO 2006	20
WHO 2021	40
<i>Gade</i>	
København, H.C.Andersens Boulevard	2,1
Aalborg, Vesterbro	2,7

13.4 Ozon

WHO har indført en ny retningslinje for langtidseksponering 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 34% til 42% over den anbefalede grænse, mens niveauet ligger noget lavere ved gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard. Her ligger niveauet omkring 20% over retningslinjen. Det lavere niveau ved gademålestationen skyldes den lokale nedbrydning af ozon grundet udledning af kvælstofoxider fra vejtrafikken.

WHO har endvidere opretholdt den gamle retningslinje for korttidseksponering for ozon baseret på 99%-fraktilen af 8-timersmiddelkoncentrationerne i et kalenderår. By- og landbaggrund ligger fra 15% til 35% over denne retningslinje i 2021, mens ozonkoncentrationerne ved gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard ligger 13% 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* µg/m³	Maksimal 8-timers Middelværdi 99%-fraktil µg/m³
WHO 2006		100
WHO 2021	60	100
<i>Gade</i>		
København, H.C.Andersens Boulevard	72	113
<i>Bybaggrund</i>		
København	84	129
Odense	85	130
Aarhus	80	121
Aalborg	81	115
<i>Landbaggrund</i>		
Keldsnoer	84	135
Risø	85	129
Ulborg	80	116

* 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 koncentrationsniveauer. 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. Årsmiddelkoncentrationerne for PM_{2,5} lå i 2022 under den gamle retningslinje på 10 µg/m³ ved alle målestationer i by- og landbaggrund og ved gademålestationerne. Selv ved H.C. Andersens Boulevard var der tale om overholdelse selv om årsmiddelværdien kun lå lige under retningslinjen. Koncentrationerne ved gademålestationerne ligger fra 70% til 100% over den nye retningslinje og ved by- og landbaggrundsmålestationerne ligger niveauet fra 40% 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}.

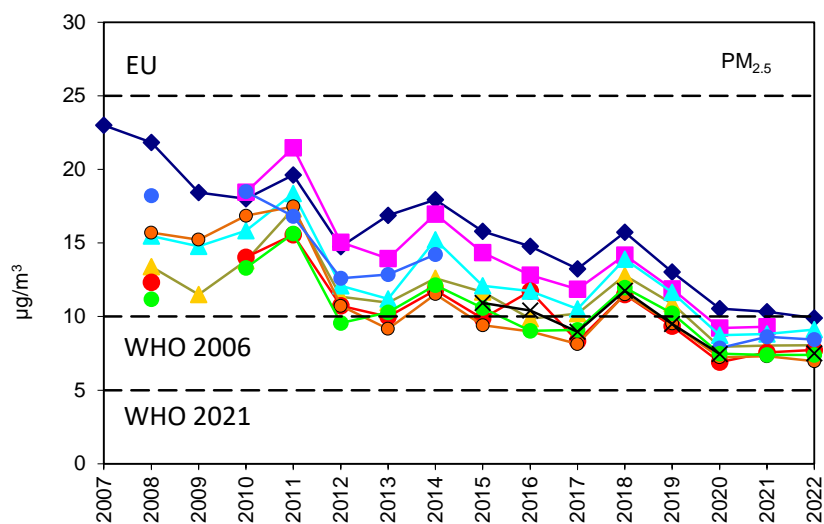
Retningslinjen for korttidseksponering for PM_{2,5} baseret på 99%-fraktilen af døgnmiddelværdierne blev overholdt ved halvdelen af målestationerne set i forhold til de gamle WHO-retningslinjer fra 2006, men set i forhold til de nye retningslinjer, så ses der relativt stor overskridelse på alle målestationer (70-100%). Koncentrationsniveauet for PM₁₀ ligger noget lavere i forhold til retningslinjerne. For PM₁₀ ligger niveauerne under den gamle retningslinje for alle målestationerne, 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 hovedsageligt er PM_{2,5}, der skal reduceres for at kunne komme til at overholde de nye retningslinjer fra WHO, og at man vil komme væsentligt nærmere på at overholde retningslinjen for 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 5 µg/m³ reduktion af PM_{2,5} ved H.C. Andersens Boulevard, så vil PM₁₀ ved H.C. Andersens Boulevard ligeledes blive reduceret med 5 µg/m³ til 18 g/m³, og dermed vil man næsten komme i overensstemmelse med retningslinjen for PM₁₀.

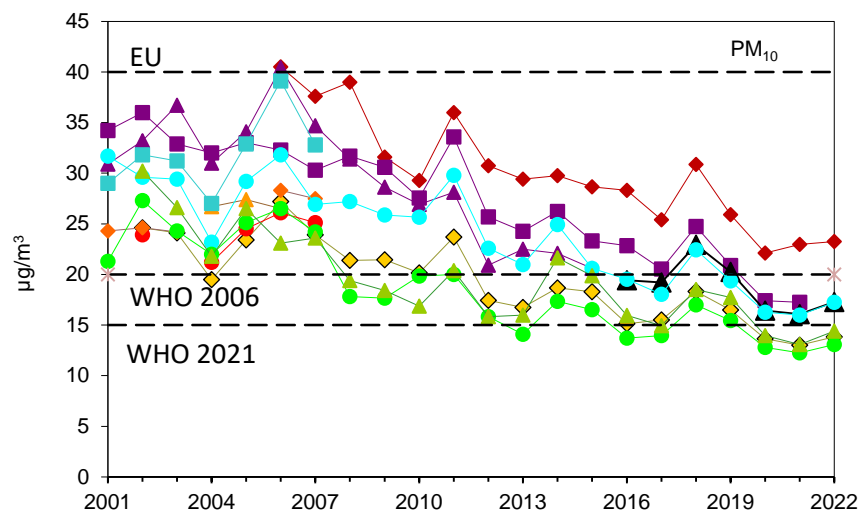
Table 13.5. Sammenligning mellem måleresultater for PM_{2,5} og PM₁₀ fra de danske målestationer og WHO's retningslinjer fra 2021 (WHO, 2021a).

	PM _{2,5} Årsmiddel	PM ₁₀ Årsmiddel	PM _{2,5} Døgnmiddel 99%-fraktil µg/m ³	PM ₁₀ Døgnmiddel 99%-fraktil µg/m ³
WHO 2006	10	20	25	50
WHO 2021	5	15	15	45
<i>Gade</i>				
København, H.C. Andersens Boulevard	9,9	23	32	60
København, Jagtvej*				
Odense, Grønløkkevej		17		41
Aarhus, Banegaardsgade	9,1	17	30	42
Aalborg, Vesterbro	8,4		28	
<i>Bybaggrund</i>				
København	8,0	14	29	37
Aarhus	7,7		28	
Aalborg	7,0		24	
<i>Forstad</i>				
Hvidovre	7,5		30	
<i>Landbaggrund</i>				
Keldsnoer		14		38
Risø	7,4	13	27	35

* Målestationen på Jagtvej, København var midlertidigt lukket i store dele af 2022 grundet omfattende vejarbejde.



- ◆ København, H.C. Andersens Boulevard
- ◆ København, Jagtvej
- ▲ Aarhus, gade
- Aalborg, gade
- ✕ Hvidovre, forstad
- ▲ København, bybaggrund
- Aarhus, bybaggrund
- Aalborg, bybaggrund
- Risø, landbaggrund



- ◆ København, H.C. Andersens Boulevard
- ◆ København, Jagtvej
- ▲ Odense, Albanigade
- ▲ Odense, Grønløkkevej
- Aarhus, gade
- Aalborg, gade
- ◆ København, bybaggrund
- ▲ Odense, bybaggrund
- Aarhus, bybaggrund
- Aalborg, bybaggrund
- Risø, landbaggrund
- ▲ Keldsnor, landbaggrund

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 2022 ligger ved de danske målestationer sammenholdt med de opdaterede retningslinjer fra WHO (2021).

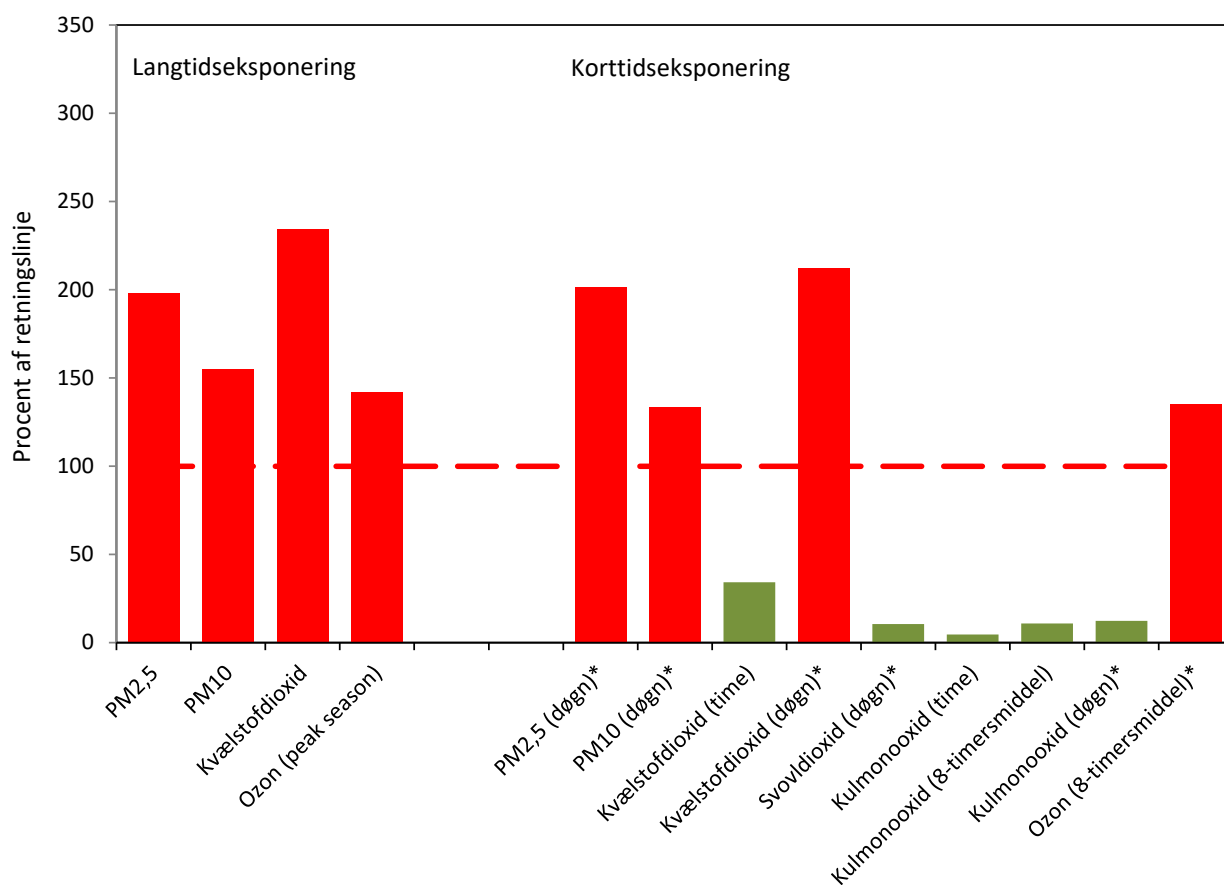
Grænse- og målværdier er indekseret til 100%. For langtidseksponering angiver søjlerne, hvor høj årsmiddelværdien var i procent af grænse- eller målværdien ved den målestation i Danmark, hvor der blev målt den højeste årsmiddelværdi.

For korttidseksponering er grænseværdierne fastlagt på den måde, at der må være et vist antal overskridelser af en fastlagt grænse. Som eksempel gælder for PM₁₀, at døgnmiddelværdierne ikke må overskride 50 µg/m³ mere end 35 gange per kalenderår. Procentsatsen vist i Figur 13.3 angiver døgnmiddelkoncentrationen for den 36. højeste døgnmiddelværdi. For 2022 gælder således, at den 36. højeste døgnmiddelkoncentration ligger på 67% af grænseværdien på 50 µg/m³, og dermed er der ikke overskridelse af grænseværdien for døgnmiddelværdien af PM₁₀. Figuren præsenterer resultaterne for de andre grænseværdier på tilsvarende vis, hvor der dog er fastlagt forskelligt antal tilladte overskridelser for de forskellige luftforureningskomponenter.

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., Friese, 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_fagrappporter/rappporter/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-chemphys.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-chemphys.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.

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): [Air Pollutants \(au.dk\)](#)

DØRS (2016): Værdi af statistisk liv, Luftforurening, Danmark fossilfri 2025. Diskussionsoplæg. Udarbejdet af formandskabet for De Økonomiske Råd til Møde i Det Miljøøkonomiske Råd den 1. marts 2016. 248 s.

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>.

EEA, 2020. Air quality in Europe – 2020 report. EEA Report No 9/2020. 162 pp., European Environmental Agency, Copenhagen, Denmark. [Air quality in Europe - 2020 report – European Environment Agency \(europa.eu\)](#)

Ellermann, T., C. Nordstrøm, J. Brandt, J. Christensen, M. Ketzel, A. Massling, R. Bossi, L. M. Frohn, C. Geels, S. S. Jensen, O.-K. Nielsen, M. Winther, M. B. Poulsen, C. Monies, M. B. Sørensen, M. S. Andersen og T. Sigsgaard, 2023. Luftkvalitet 2021. Status for den nationale luftkvalitetsovervågning. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 148 s. - Videnskabelig rapport nr. 533. <http://dce2.au.dk/pub/SR533.pdf>

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. Videnskabelig rapport nr. 467. <http://dce2.au.dk/pub/SR467.pdf>

Ellermann, T., Nordstrøm, C., Brandt, J., Christensen, J., Ketzel, M., Massling, A., Bossi, R., Frohn, L.M., Geels, C., Jensen, S.S., Ole-Kenneth Nielsen, O.-K., Winther, M., Poulsen, M.B., Monies, C., Sørensen, M.B., Andersen, M.S. og Sigsgaard, T., 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>

Ellermann, T., Bossi, R., Nygaard, J., Christensen, J., Løfstrøm, P., Monies, C., Geels, C., Nielsen, I. E., & Poulsen, M. B., 2021: Atmosfærisk deposition 2019. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. 90s. - Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 415. <http://dce2.au.dk/pub/SR415.pdf>

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. <http://dce2.au.dk/pub/SR234.pdf>

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>

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. Pp. 518. ISBN: 9282877825

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., Kukkonen, 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>.

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>

Jensen, S.S., Christensen, J.H., Frohn, L.M., Ketzel, M., Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., 2023. Nationalt program for reduktion af luftforurening (NAPCP) - Udvikling i luftkvalitet og kvælstofafsætning frem til 2030. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 47 s. – Videnskabelig rapport nr. 538. <http://dce2.au.dk/pub/SR538.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*.

Lehtomaki, 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.

Miljøministeriet, 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., Albrektsen, R., Hjelgaard, K.H. & Bruun, H.G. 2023. Annual Danish Informative Inventory Report to UNECE. Emission inventories from the base year of the protocols to year 2021. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 603 pp. Scientific Report No. 540. <http://dce2.au.dk/pub/SR540.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. 134 pp. Environmental Project No. 1307, 2009. Miljøprojekt. Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, Denmark.

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. Fehcht, 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. Fehcht, 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-projectrecommndations-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://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/). <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 PM₁₀ på gadeniveau samt 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 2022 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 µg/m³ 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 2022 er vist i tabel A.1.

Sammenligning mellem model og målinger for kvælstofdioxidkoncentrationerne for 2022 viser både under- og overestimering på -26% til 15% for fire ud af fem gadestationer. For den femte gadestation Jagtvej i København er der ikke tilstrækkelig antal målinger til at lave en sammenligning. Modelresultater for NO₂ har i foregående år signifikant overestimeret målingerne, mens overensstemmelse er blevet markant bedre i dette års beregninger. Der er også tilfældet på baggrundsstationer. Forbedring skyldes en mere detaljeret emissionsberegning på gadeniveau, som bl.a. inddrager elektrificering af dele af trafikken samt en ny kalibrering af UBM modellen, hvor den initiale spredningshøjde er ændret ($H_0 = 18$ meter).

De modellerede årsmiddelkoncentrationerne for kvælstofdioxid er væsentligt under EU's grænseværdi på 40 µg/m³, men væsentligt over WHO's retningslinjer på 10 µg/m³, på alle gadestationer. Bybaggrund- og landbaggrundsstationer overholder WHO's nye retningslinjer.

Tabel A.1. Sammenligning af modellerede og målte årsmiddelkoncentrationer for kvælstofdioxid i 2022. Ingen målinger til sammenligning på Jagtvej pga. vejarbejde.

Unit: µg/m ³	Målinger	Modelresultater	Difference	Model
Gade:				
København/H CAB / 1103	23,6	27,1	15%	DEHM/UBM/OSPM
København/Jagtvej / 1257	-	20,3	-	DEHM/UBM/OSPM
Aarhus / 6153	19,2	14,2	-26%	DEHM/UBM/OSPM
Aalborg / 8152	16,1	15,8	-2,1%	DEHM/UBM/OSPM
Odense / 9156	12,2	12,6	3,5%	DEHM/UBM/OSPM
Bybaggrund:				
København / 1259	9,5	10,4	8,9%	DEHM/UBM
Aarhus / 6160	9,1	8,7	-4,4%	DEHM/UBM
Odense / 9159	6,0	8,1	34,9%	DEHM/UBM
Aalborg / 8159	8,2	8,2	0,8%	DEHM/UBM
Forstad:				
Hvidovre / 2650	9,6	9,0	-6,4%	DEHM/UBM
Landbaggrund:				
Risø / 2090	5,1	7,3	44%	DEHM/UBM
Keldsnor / 9055	6,2	8,3	34%	DEHM/UBM
Ulborg / 7060	2,9	3,8	30%	DEHM/UBM
Anholt / 6001	3,5	5,7	65%	DEHM/UBM

Sammenligning mellem modellerede og målte PM_{2,5}- og PM₁₀-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 PM_{2,5} og PM₁₀ på de tre gadestationer ligger forholdsvis tæt på de målte værdier med mindre relative afvigelser fra -10% til 8%. Der er en let overestimering på bybaggrunds-, forstads- og landbaggrundsstationer fra -2% til 15%.

De modellerede PM_{2,5}-årsmiddelkoncentrationerne er væsentligt under EU's grænseværdi på 25 µg/m³, men over WHO's nye retningslinjer på 5 µg/m³, hvilket gælder alle typer af stationer.

For de modellerede PM₁₀-årsmiddelkoncentrationerne er de ligeledes væsentligt under EU's grænseværdi på 40 µg/m³, men gadestationer ligger over WHO's nye retningslinjer på 15 µg/m³. Bybaggrund- og landbaggrundsstationer overholder WHO's nye retningslinjer.

Tabel A.2. Sammenligning mellem årsmidler af modellerede (inkl. korrektion) og målte PM_{2,5}-koncentrationer i 2022. Målinger i denne tabel er angivet for atmosfæriske standardbetingelser, mens tabellen i kapitel 7 giver værdier under ambiente betingelser. Derfor optræder der minimale forskelle. Ingen målinger til sammenligning på Jagtvej pga. vejarbejde.

Enhed: µg/m ³	Målinger	Modelresultater	Difference	Model anvendt
Gade:				
Copenhagen/HCAB / 1103	10,4	11,2	7,5%	DEHM/UBM/OSPM
Copenhagen/Jagtvej / 1257	-	10,3	-	DEHM/UBM/OSPM
Aarhus / 6153	9,5	9,2	-2,7%	DEHM/UBM/OSPM
Aalborg / 8152	8,8	8,1	-8,1%	DEHM/UBM/OSPM
Bybaggrund:				
Copenhagen / 1259	8,4	8,8	4,4%	DEHM/UBM
Aarhus / 6160	8,0	8,4	4,5%	DEHM/UBM
Aalborg / 8159	7,3	7,1	-2,2%	DEHM/UBM
Forstad:				
Hvidovre / 2650	7,8	8,8	12,7%	DEHM/UBM
Landbaggrund:				
Risø / 2090	7,7	8,6	11,1%	DEHM/UBM

Tabel A.3. Sammenligning mellem modellerede og målte PM₁₀-koncentrationer i 2022. Målinger i denne tabel er angivet for atmosfæriske standardbetingelser, mens tabellen i kapitel 7 giver værdier under ambiente betingelser. Derfor optræder der minimale forskelle. Ingen målinger til sammenligning på Jagtvej pga. vejarbejde.

Enhed: µg/m ³	Målinger	Modelresultater	Difference	Model anvendt
Gade:				
København/HCAB / 1103	24,3	21,8	-10,1%	DEHM/UBM/OSPM
København/Jagtvej / 1257	-	18,8	-	DEHM/UBM/OSPM
Aarhus / 6153	18,0	18,8	4,3%	DEHM/UBM/OSPM
Odense / 9156	18,0	18,0	-0,4%	DEHM/UBM/OSPM
Bybaggrund:				
Copenhagen / 1259	14,6	14,6	0,0%	DEHM/UBM
Landbaggrund:				
Risø / 2090	13,7	14,7	7,9%	DEHM/UBM
Keldsnor / 9055	14,9	17,2	14,9%	DEHM/UBM

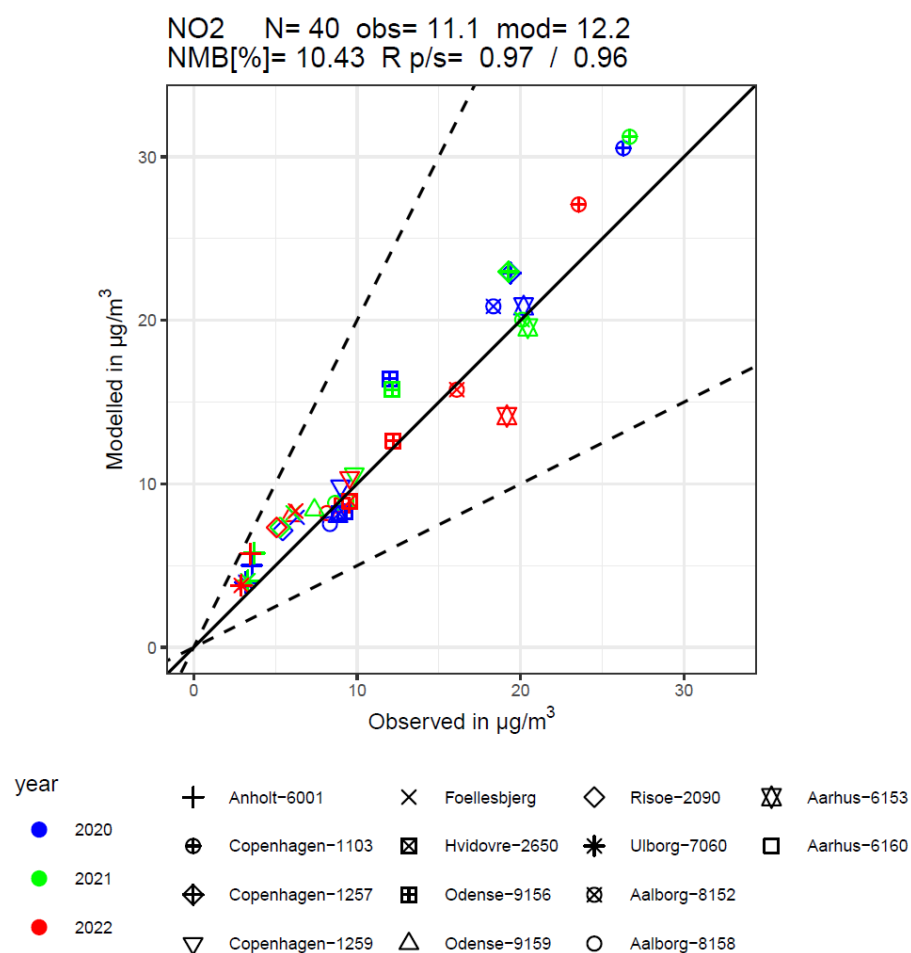
Detaljer om kalibrering af OSPM og validering af modelresultater

For PM_{2,5}/PM₁₀ var kalibrering nødvendigt, da sammenligninger mellem model og målinger 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 bybaggrundsstationer. 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. Figurerne indeholder data for årene 2020 til 2022 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 figurerens signaturforklaringer.

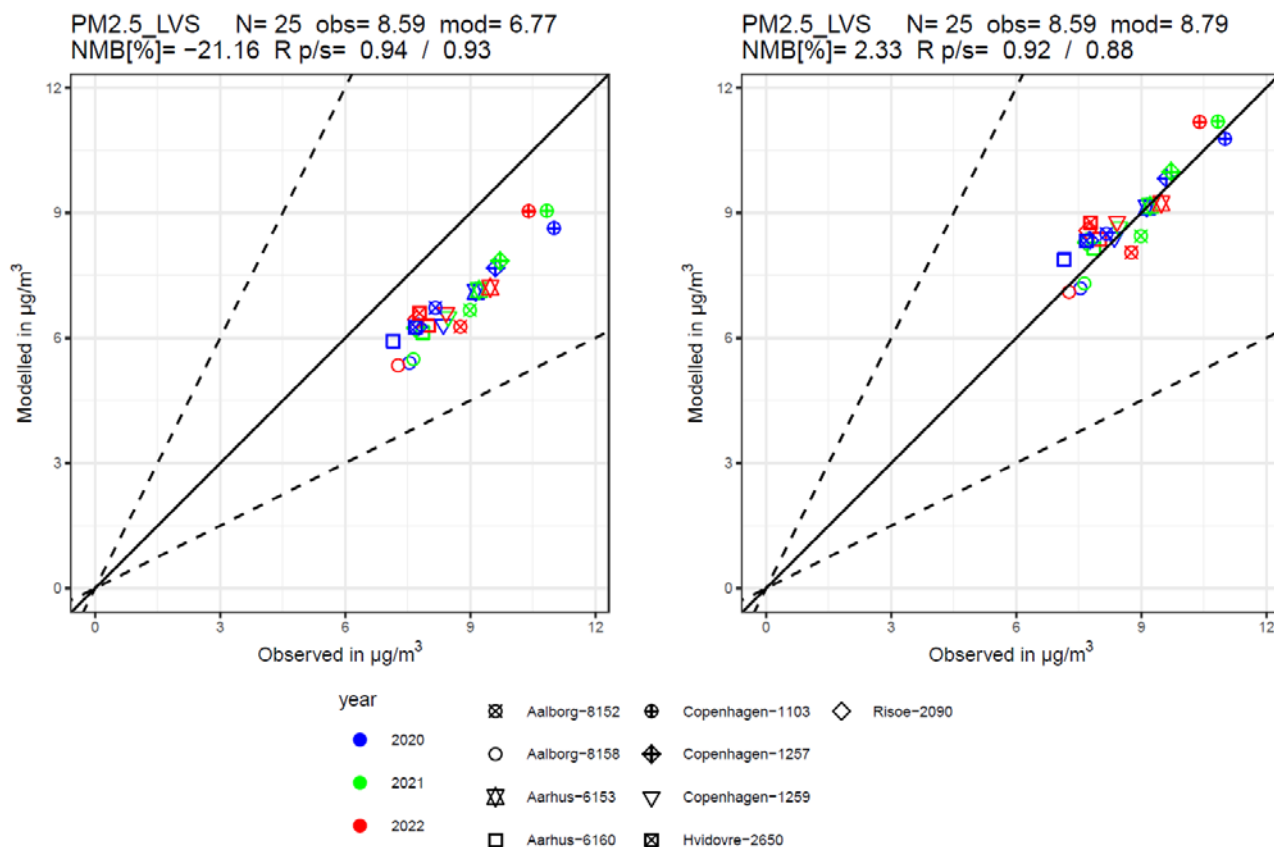
I figur A.1 vises korrelation mellem modelleret og målt årsmiddel for kvælstofdioxid fra 2020 til 2022. Der findes 40 datapunkter og det gennemsnitlige målte niveau er $11,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mens modelleret niveau er $12,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Korrelationskoefficienter efter Pearson eller Spearman (R p/s) er meget høj (0,97 / 0,96) og den Normalized Mean Bias (NMB) er lav (10,4%) – mere end en halvering i sammenligning med sidste års rapportering.



Figur A.1. Sammenligning mellem modellerede og målte årsmiddelkoncentrationer af kvælstofdioxid for alle stationer for 2020-2022.

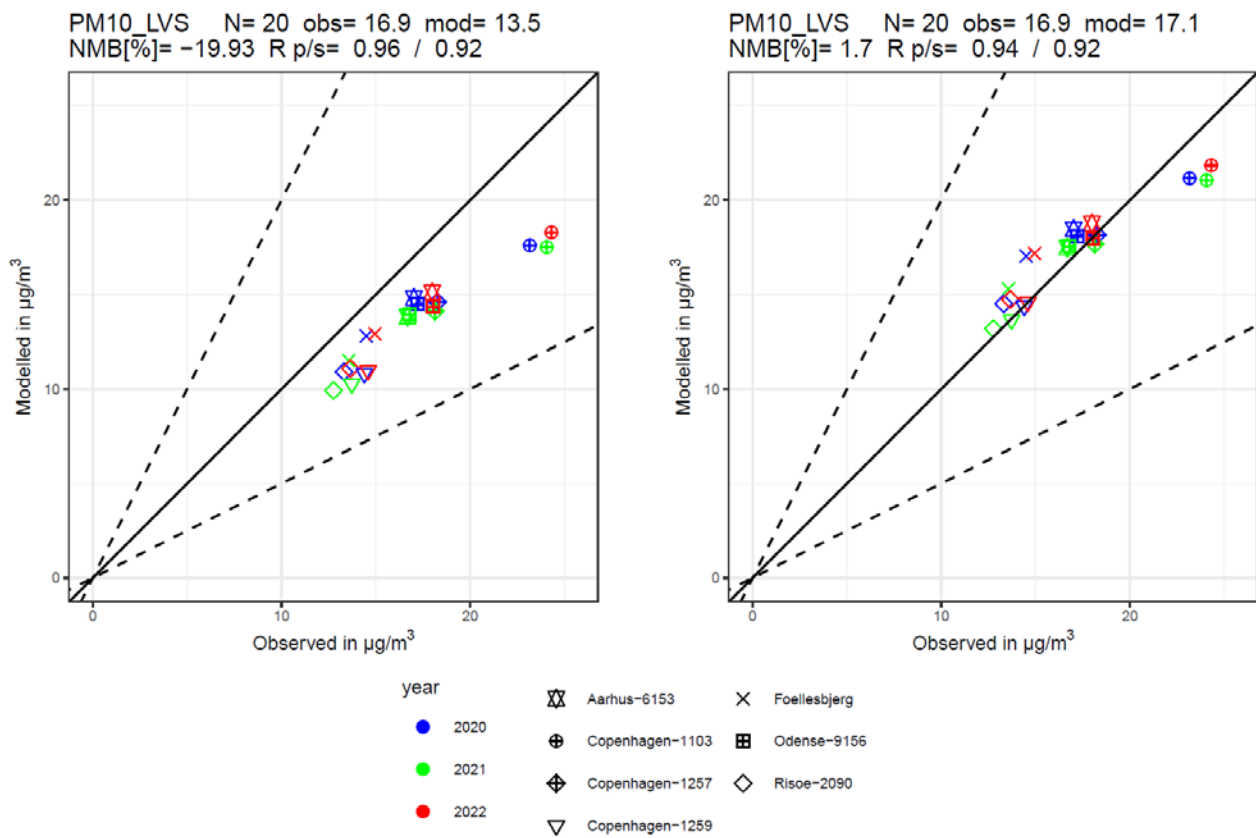
I figur A.2 vises sammenhæng mellem modelleret (både før og efter korrigerig) og målt årsmiddel for $\text{PM}_{2,5}$ fra 2020 til 2022. Der findes 25 datapunkter og det gennemsnitlige målte niveau er $8,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mens modelleret niveau er $6,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ før korrigerig og $8,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ efter korrigerig. Som beskrevet tid-

ligere er det lokale gadebidrag ikke korrigeret, og derfor er ratio før/ efter korrigering ikke ens for gadestationer og korrelationskoefficienter er lidt forskellige men generelt meget høje. Den betydelige underestimering bliver fjernet via den brugte korrigering. Efter korrigering er korrelationskoefficienter efter Pearson eller Spearman (R p/s) 0,92 og 0,88 og den Normalized Mean Bias (NMB) er meget lav (2,3%), og er på samme niveau i sammenligning med sidste års rapportering.



Figur A.2. Sammenligning mellem de ukorrigerede (venstre) og korrigerede (højre) modellerede og målte årsmiddelkoncentrationer af $\text{PM}_{2.5}$ for alle stationer for 2020-2022.

I figur A.3 vises sammenhængen mellem modelleret (både før og efter korrigering) og målt årsmiddel for PM_{10} fra 2020 til 2022. Der findes 20 datapunkter, og det gennemsnitlige målte niveau er $16,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mens modelleret niveau er $13,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ før korrigering og $17,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ efter korrigering. Som beskrevet tidligere er det lokale gadebidrag ikke korrigeret og derfor er ratio før/efter korrigering ikke ens for gadestationer og korrelationskoefficienter er lidt forskellige men generelt meget høje. Den betydelige underestimering bliver fjernet via den brugte korrigering. Efter korrektur er korrelationskoefficienter efter Pearson eller Spearman (R p/s) 0,94 og 0,92 og den Normalized Mean Bias (NMB) meget lav (1,7 %), og er på samme niveau i sammenligning med sidste års rapportering.



Figur A.3. Sammenligning mellem ukorrigerede (venstre) og korrigerede (højre) modellerede og målte årsmiddelkoncentrationer af PM₁₀ for alle stationer for 2020-2022.

LUFTKVALITET 2022

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 2022 blev luftkvaliteten målt i de fire største byer og ved fire målestationer i baggrundsområder uden for byerne. I 2022 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 3.660 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 55% siden 1990.

ISBN: 978-87-7156-833-2
ISSN: 2244-9981