



LUFTKVALITET 2020

Status for den nationale luftkvalitetsovervågning i Danmark

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 467

2022



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

LUFTKVALITET 2020

Status for den nationale luftkvalitetsovervågning i Danmark

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 467

2022

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

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. 467
Titel:	Luftkvalitet 2020
Undertitel:	Status for den nationale luftkvalitetsovervågning i Danmark
Kategori:	Rådgivningsrapporter
Forfattere:	Thomas Ellermann, Claus Nordstrøm, Jørgen Brandt, Jesper Christensen, Matthias Ketzel, Andreas Massling, Rossana Bossi, Lise Marie Frohn, Camilla Geels, Steen Solvang Jensen, Ole-Kenneth Nielsen, Morten Winther, Maria Bech Poulsen, Christian Monies og Martin Ole Bjært Sørensen
Institution:	Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	Februar 2022
Redaktion afsluttet:	December 2021
Faglig kommentering:	Anne Sofie Lansø, 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/SR467_komm.pdf
Finansiel støtte:	Miljøministeriet
Bedes citeret:	Thomas Ellermann, Claus Nordstrøm, Jørgen Brandt, Jesper Christensen, Matthias Ketzel, Andreas Massling, Rossana Bossi, Lise Marie Frohn, Camilla Geels, Steen Solvang Jensen, Ole-Kenneth Nielsen, Morten Winther, Maria Bech Poulsen, Christian Monies og Martin Bjært Sørensen. 2022. Luftkvalitet 2020. Status for den nationale luftkvalitetsovervågning. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 144 s. - Videnskabelig rapport nr. 467. http://dce2.au.dk/pub/SR467.pdf
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Rapporten giver en status for 2020 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 2020 blev luftkvaliteten målt i de fire største byer og ved fire målestationer i baggrundsområder uden for byerne. I 2020 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 heller ingen overskridelser af grænseværdien. 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 2020 var omkring 4.000 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 50% 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:	978-87-7156-637-6
ISSN (elektronisk):	2244-9981
Sideantal:	144
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som http://dce2.au.dk/pub/SR467.pdf

Indhold

Indhold	3
Sammenfatning	5
Opgørelse over udledninger af luftforurening	5
Status og udvikling for luftkvalitet	7
Helbredseffekter og økonomiske omkostninger af luftforureningen	11
Summary	14
Emission inventories	14
State and long-term trends of the air quality	16
Health effects and external economic costs of air pollution in Denmark	20
1. Indledning	23
1.1 Opgørelse af udledninger	25
1.2 Målenetværk	26
1.3 Målemetoder	28
1.4 Modelberegninger	29
1.5 Helbredseffekter og økonomiske omkostninger som følge af luftforureningen	33
2. Kvælstofdioxid, NO₂ og kvælstofoxider, NO_x	35
2.1 Udledninger	35
2.2 Status for luftkvalitet	37
2.3 Udviklingstendens	38
2.4 Modelberegninger	40
3. Carbonmonoxid, CO	50
3.1 Udledninger	50
3.2 Status for luftkvalitet	51
3.3 Udviklingstendens	52
4. Svovldioxid, SO₂	54
4.1 Udledninger	54
4.2 Status for luftkvalitet	56
4.3 Udviklingstendens	57
5. Flygtige organiske forbindelser, VOC	59
5.1 Udledninger	59
5.2 Status for luftkvalitet	61
5.3 Udviklingstendens	63
6. Ozon, O₃	64
6.1 Status for luftkvalitet	64
6.2 Udviklingstendens	65
6.3 Modelberegninger	66

7. Luftbårne partikler	69
7.1 Udledninger	70
7.2 Status for luftkvalitet	73
7.3 Udviklingstendens	75
7.4 Modelberegninger	80
8. Elementært – og organisk kulstof	84
8.1 Udledninger	85
8.2 Status for luftkvalitet	86
8.3 Udviklingstendens	87
9. Tungmetaller	89
9.1 Udledninger	90
9.2 Luftkvalitet	91
9.3 Udviklingstendens	93
10. Polycykliske aromatiske kulbrinter og benz[a]pyren	96
10.1 Udledninger	96
10.2 Status for luftkvalitet	98
10.3 Udviklingstendens	98
11. Den kemiske sammensætning af fine partikler	100
11.1 Kilderne til de uorganiske ioner	100
11.2 Status for 2020	101
12. Helbredseffekter og eksterne omkostninger relateret til luftforurening	106
12.1 Status og trends for helbredseffekter	109
12.2 Status for eksterne omkostninger som følge af helbredseffekter	112
12.3 Kilder til helbredseffekter af luftforureningen i Danmark i 2020	113
12.4 Danske og udenlandske kilder til de eksterne omkostninger af luftforureningen i Danmark 2020	117
12.5 Usikkerhed og perspektiver for de fremtidige beregninger	122
13. Luftkvalitet og WHO's nye anbefalinger	124
13.1 Kvælstofdioxid	124
13.2 Carbonmonoxid	126
13.3 Svovldioxid	126
13.4 Ozon	127
13.5 Partikler, PM _{2.5} og PM ₁₀	128
13.6 Sammenfatning	131
14. Referencer	132
Bilag 1	139
Detaljer om kalibrering af OSPM og validering af modelresultater	141

Sammenfatning

Rapporten præsenterer resultater for 2020 fra den nationale overvågning af luftkvalitet med særligt fokus på den helbredsskadelige effekt af luftforureningen. Overvågningsprogrammet dækker hele Danmark, men der er særligt fokus på forholdene i byerne, hvor luftforureningen er højest, og hvor der bor flest mennesker. DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi (DCE) ved Aarhus Universitet gennemfører overvågningen af luftkvalitet for Miljøministeriet i samarbejde med kommunerne i København, Odense, Aarhus og Aalborg.

Formålet med overvågningsprogrammet er, at:

- dokumentere status for luftkvaliteten og vurdere status i forhold til EU's grænse- og målværdier for luftkvaliteten,
- bestemme udviklingstendensen for luftkvaliteten for dermed at kunne vurdere effekten af de nationale og internationale tiltag der er gennemført for at reducere udledningerne,
- varsle befolkningen ved overskridelse af EU's varslingstærskler (i Danmark relevant for ozon), og
- opgøre helbredseffekterne og de økonomiske omkostninger som følge af luftforureningen i Danmark. I år omfatter denne del også en detaljeret opgørelse over kilderne til helbredseffekterne, som er finansieret særskilt af Miljøministeriet.

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'er) samt udvalgte flygtige organiske kulbrinter (VOC'er), der kan føre til dannelse af O_3 . Alle disse luftforureningskomponenter kan give anledning til negative helbredseffekter.

Opgørelse over udledninger af luftforurening

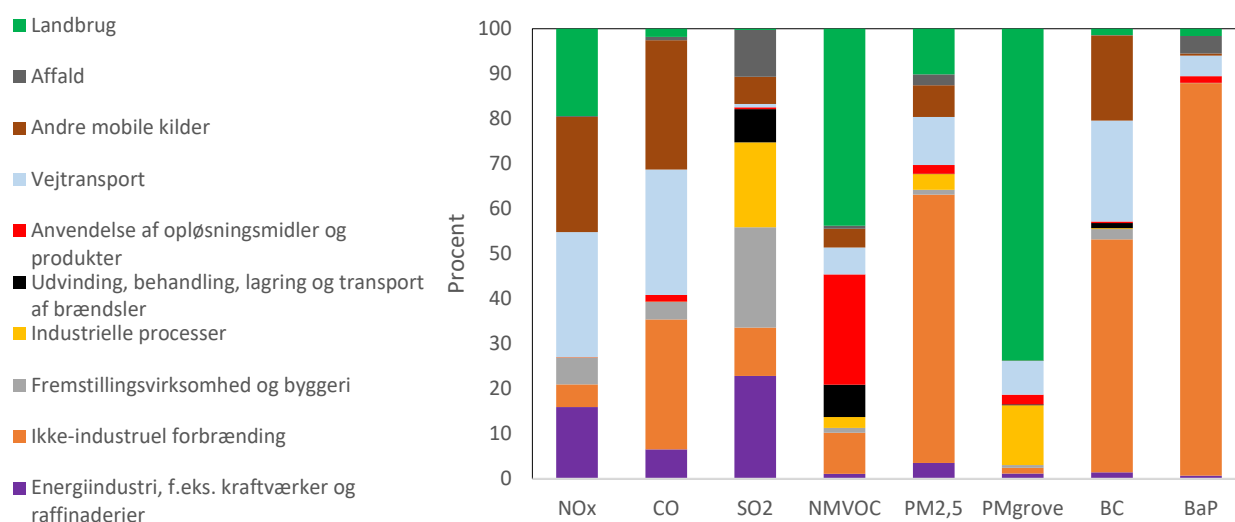
Rapporten giver en oversigt over udledning af luftforurening fra danske og europæiske kilder. Dels gives en status for de vigtigste kilders bidrag til udledningerne i 2019, som er de seneste opdaterede opgørelser. Dels præsenteres udviklingstendensen for udledningen af de forskellige luftforureningskomponenter. Viden om kilderne og udviklingstendensen for udledningerne giver en god baggrund for at forstå årsagerne til den geografiske fordeling af og udviklingstendenserne for luftforureningskomponenterne. Data om de

danske udledninger er baseret på de nationale opgørelser over udledningerne, som udarbejdes af DCE for Miljøministeriet (Nielsen et al., 2021) og fra den fælleseuropæiske database over udledningerne fra medlemslandene i EU (CEIP, 2021).

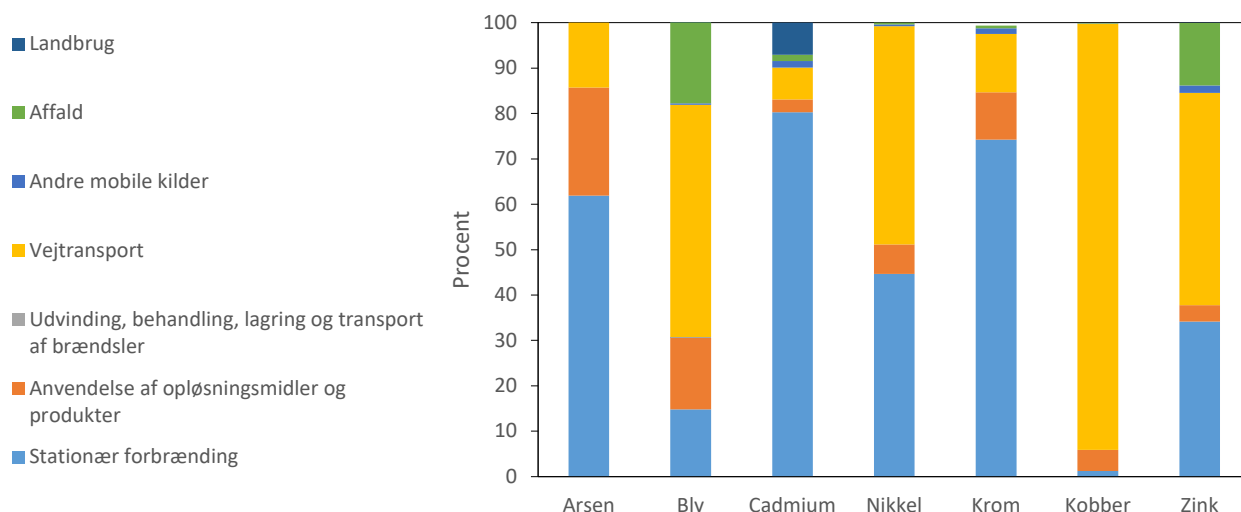
Kilderne til udledningerne af luftforureningen varierer mellem de forskellige luftforureningskomponenter. Figur 1 og 2 viser bidraget til udledningerne opdelt i de hovedkategorier, som anvendes i forbindelse med den internationale indrapportering af udledningerne. For partiklerne inkluderer opgørelserne 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%. Arsen, nikkel og krom er reduceret med omkring 70-85%. Kvælstofoxiderne, black carbon (BC) og carbonmonoxid er reduceret med omkring 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%. 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.

Specielt for benz[a]pyren kan det bemærkes, at der ved denne årsrapportering er sket en justering af udviklingstendensen set i forhold til sidste års rapportering, idet Energistyrelsen i forbindelse med energistatistikken for 2019 opdaterede datagrundlaget. Dette inkluderede en reduktion af brændeforbruget i husholdninger (35% fald fra 2016 til 2019), hvilket blev reflekteret i udledningsopgørelserne rapporteret i 2021 (Nielsen et al., 2021).



Figur 1. Udledning af en række vigtige luftforureningskomponenter fra danske kilder i 2019 opdelt i hovedkategorier (Nielsen et al., 2021). Opdelingen i hovedkategorier følger standard for indrapportering til EU. Følgende luftforureningskomponenter indgår: kvælstofoxider (NO_x), carbonmonoxid (CO), svovldioxid (SO₂), flygtige organiske forbindelser uden metan (NMVOC), fine partikler (PM_{2,5} = partikler med diameter under 2,5 µm), grove partikler (PM_{grove} = partikler med diameter mellem 2,5 og 10 µm), black carbon (BC) og benz[a]pyren (BaP). Opgørelserne af udledningerne dækker kun de direkte udledte partikler og ikke de partikler, som dannes sekundært via de kemiske reaktioner i luften.



Figur 2. Udledning af udvalgte tungmetaller fra danske kilder i 2019 opdelt i hovedkategorier (Nielsen et., 2021). Opdelingen i hovedkategorier følger standard for indrapportering til EU.

Status og udvikling for luftkvalitet

Der er fastsat grænse- og målværdier for hovedparten af de målte stoffer i EU's luftkvalitetsdirektiver (EU, 2008; EU, 2004). En detaljeret beskrivelse af gældende mål- og grænseværdier og deres gennemførelse i dansk lov findes i en bekendtgørelse fra Miljø- og Fødevarerministeriet (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 2020 med både EU's grænse- og målværdier og de nye retningslinjer fra WHO.

I 2020 blev grænseværdierne for kvælstofdioxid ikke overskredet. Koncentrationerne af kvælstofdioxid ved gademålestationerne faldt betydeligt fra 2019 til 2020, og dermed ligger årsmiddelkoncentrationerne ved selv den mest forurenende gademålestation (H.C. Andersens Boulevard) nu næsten 25% under grænseværdien. Luftkoncentrationerne for kvælstofdioxid er faldet med omkring 50% på gademålestationerne siden 2005.

Luftkoncentrationerne for de fine partikler ($PM_{2.5}$) overholdt grænseværdien på $25 \mu g/m^3$ som årsmiddelværdi på alle målestationer. AEI-værdien (Average Exposure Indicator, som er defineret som middel af tre års gennemsnit af årsgennemsnittet af $PM_{2.5}$ i bybaggrund) er faldet med omkring 30 % siden 2010. Dermed er det nationale reduktionsmål (15 % reduktion siden 2010; EU, 2008) nået. Luftkoncentrationerne er faldet med 30-50% siden opstart af målingerne i henholdsvis 2007/2008.

Resultaterne fra en detaljeret analyse af den kemiske sammensætning af de fine partikler i landbaggrund ved Risø, bybaggrund ved H.C. Ørsted Institut og ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard viser, at selv ved den mest forurenede målestation på H.C. Andersens Boulevard kommer omkring 25% af forureningen med fine partikler fra kilder i København, mens omkring 75% af forureningen med fine partikler kommer fra udenlandske kilder og kilder i det øvrige Danmark.

PM₁₀ overholdt grænseværdien på 40 µg/m³ som årsmiddelværdi på alle målestationer. Ligeledes var der ingen målestationer i måleprogrammet, hvor det tilladte antal overskridelser af den daglige middelværdi for PM₁₀ (50 µg/m³ må ikke overskrides mere end 35 gange årligt) blev overskredet. PM₁₀ er faldet med 30 - 45% siden opstart af målingerne i 2001.

De tekniske problemer med måling af partikelantal blev løst i begyndelse af 2020, så derfor præsenterer rapporten resultaterne fra måling af partikelantal i området fra 41- 478/550 nm og 11-478/550 nm (mangler data i perioden fra 2016-2019). Antallet af partikler i området fra 11-480/550 nm var omkring 8.900 partikler per cm³ på gademålestationen H. C. Andersens Boulevard, hvilket er en faktor to højere end ved forstadsstationen i Hvidovre og omkring en faktor 3 højere end ved by- og landbaggrundsstationen ved henholdsvis H. C. Ørsted Instituttet og Risø. Siden 2002 er partikelantallet for begge fraktioner faldet med omkring 70% og 45% ved henholdsvis gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard og bybaggrundsmålestationen i København. I landbaggrund ved Risø er partikelantallet siden 2005 faldet med omkring 40% for fraktionen fra 11 - 478/550 nm og omkring 50% for partikelfraktionen fra 41 - 478/550 nm.

Luftkoncentrationerne af elementært kulstof (EC) ligger på omkring 0,7 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 70% 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.

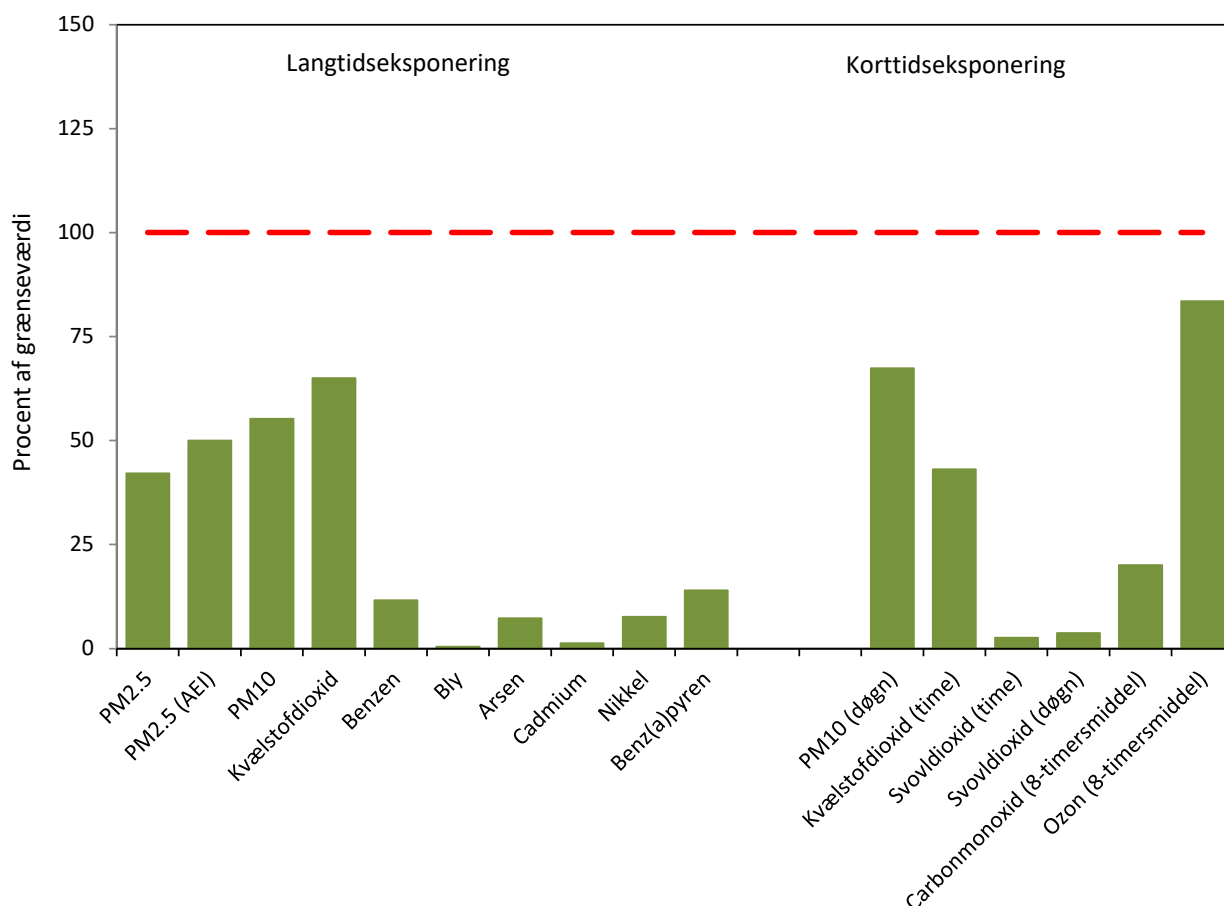
Ozonkoncentrationerne i 2020 var på niveau med tidligere år. Der er ikke fastsat egentlige grænseværdier for ozon, men kun "målværdier" og "langsigtede mål" (hensigtsværdier). Målværdien for ozon angiver, at 8-timersmålværdierne ikke må overskrides mere end 25 gange som gennemsnit for tre år. I 2020 var der ingen overskridelser af målværdien for beskyttelse af sundhed. Det planlagte langsigtede mål (8-timersmiddelværdi på 120 µg/m³) er endnu ikke trådt i kraft, og der er ikke taget beslutning om hvornår, dette skal ske. Såfremt det langsigtede mål havde været gældende, så ville det have været overskredet på alle målestationerne i 2020 undtagen gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard. Tærsklen for information af befolkningen om høje ozonniveauer (timemiddel 180 µg/m³) blev ikke overskredet i 2020. Årsmiddelsoncentrationerne for ozon har ligget på stort set samme niveau den seneste årrække undtagen på gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard, hvor der måles en stigning grundet faldet i udledningerne af kvælstofoxider fra navnlig vejtrafik i byerne.

Årsmiddelsoncentrationerne for benz[a]pyren i 2020 var 0,13 ng/m³ og 0,14 ng/m³ på henholdsvis H. C. Andersens Boulevard og ved målestationen i Hvidovre. Målværdien på 1 ng/m³ blev således ikke overskredet i 2020. Luftkoncentrationerne på H.C. Andersens Boulevard og Hvidovre er faldet med omkring 50-60% siden 2008.

Målinger af 17 udvalgte flygtige organiske forbindelser i bybaggrund i København viser koncentrationsniveauer, som spænder fra 0,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ til 0,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2020. Benzen er den eneste flygtige organiske forbindelse, hvor der er fastlagt en grænseværdi. I 2020 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. Benzen er faldet med omkring 90% siden 1998.

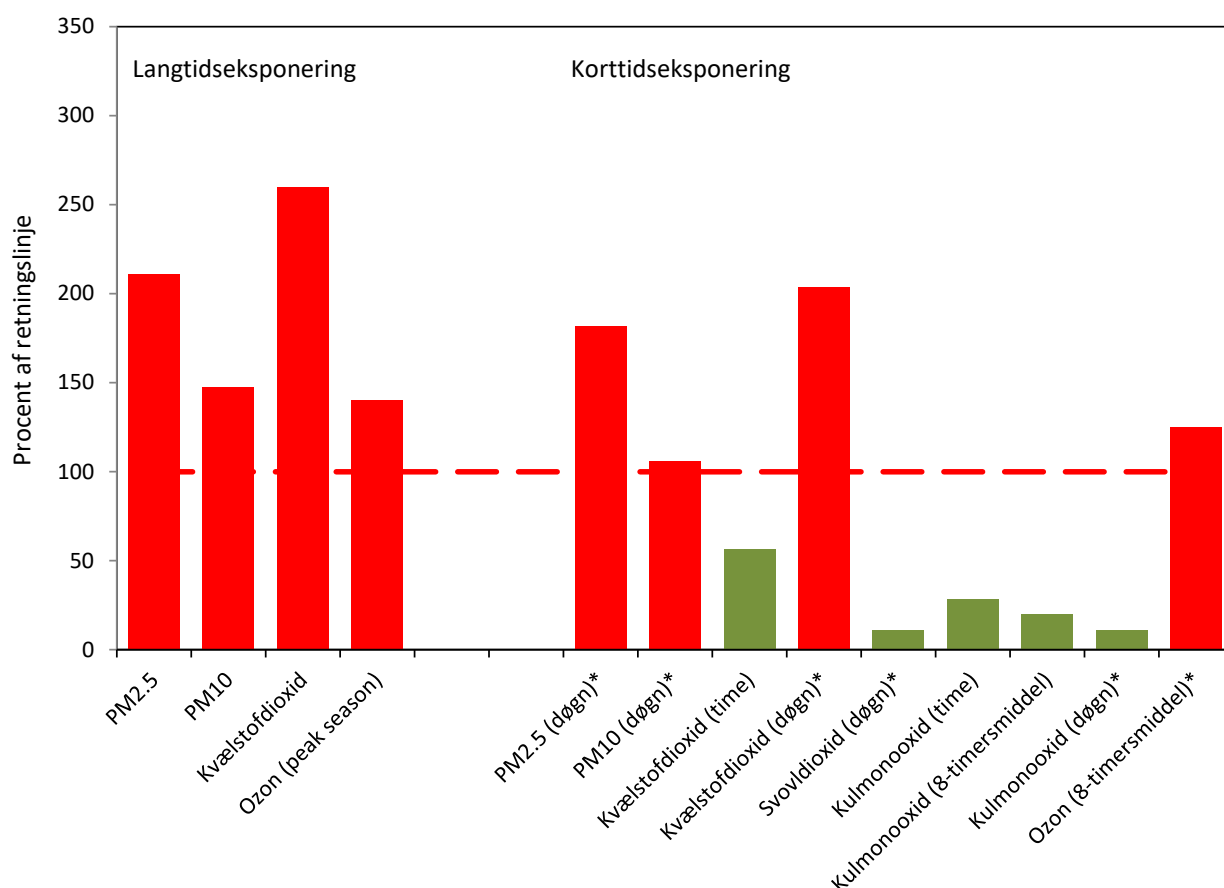
Målingerne af luftkoncentrationerne af tungmetaller og andre metaller viser, at der er sket et betydeligt fald i koncentrationerne for mange af stofferne siden 1982. Mest markant for bly, hvor koncentrationen er faldet med mere end 99% siden 1982 på H.C. Andersens Boulevard. Arsen er faldet med omkring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

Figur 3 giver en sammenfatning af status for luftkvalitet i relation til EU's grænse- og målværdier for ovennævnte luftforureningskomponenter. Som det fremgår af figuren, var der ingen overskridelser af grænse- og målværdierne. For korttidseksposering er grænseværdierne fastlagt på den måde, at der må være et vist antal overskridelser af en fastlagt grænse. Som eksempel gælder for PM_{10} , at døgnmiddelværdierne ikke må overskride 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mere end 35 gange per kalenderår. Procentsatsen vist i Figur 3 angiver døgnmiddelsoncentrationen for den 36. højeste døgnmiddelværdi. For 2020 gælder således, at den 36. højeste døgnmiddelsoncentration ligger på 67% af grænseværdien på 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, og dermed er der ikke overskridelse af grænseværdien for døgnmiddelværdien af PM_{10} . Figuren præsenterer resultaterne for de andre grænseværdier på tilsvarende vis, hvor der dog er fastlagt forskelligt antal tilladte overskridelser for de forskellige luftforureningskomponenter.



Figur 3. Oversigt over overholdelsen af EU's langsigtede og kortsigtede grænse- og målværdier for luftforureningskomponenterne omfattet af EU's luftkvalitetsdirektiver (EU 2004; EU, 2008). De langsigtede grænse- og målværdier er baseret på årsmiddelkoncentrationer, mens de kortsigtede grænse- og målværdier er baseret på time-, døgn- eller 8-timersmiddelværdier. Grænse- og målværdier er indekseret til 100% og luftkoncentrationerne er angivet i procent af grænse- og målværdier. Det er de højeste værdier målt i Danmark, som er angivet, og da alle koncentrationer ligger under 100%, er der ingen overskridelser af grænse- og målværdier i Danmark i 2020. PM_{2,5} (AEI) står for "Average Exposure Indicator", der er middelkoncentrationen for PM_{2,5} i bybaggrund i København, Aarhus og Aalborg.

I september 2021 offentliggjorde WHO opdaterede retningslinjer for luftforureningen for de mest helbredsskadelige luftforureningskomponenter (WHO, 2021a). Figur 4 giver et samlet overblik over, hvordan koncentrationsniveauerne for kvælstofdioxid, carbonmonoxid, svovldioxid, ozon og partikler (PM_{2,5} og PM₁₀) ligger ved de danske målestationer sammenholdt med de opdaterede retningslinjer fra WHO (2021a). WHO's retningslinjer for langtids-eksponering er overskredet for alle luftforureningskomponenter med størst overskridelse for PM_{2,5} og kvælstofdioxid. For korttidseksponering ses ligeledes overskridelse af WHO's retningslinjer for PM_{2,5}, PM₁₀, kvælstofdioxid og ozon. Til gengæld ligger niveauerne for svovldioxid og carbonmonoxid klart under de nye retningslinjer fra WHO. De mest helbredsskadelige luftforureningskomponenter (partikler, kvælstofdioxid og ozon) viser størst overskridelse af WHO's retningslinjer. Dette er med til at understrege, at der er behov for at reducere luftforureningen med disse komponenter yderligere, hvis man ønsker at opnå en reduktion af de helbredsskadelige effekter fra luftforureningen, som er omtalt i denne rapport (se nedenfor).



Figur 4. Oversigt over luftkvalitet i Danmark sammenholdt med WHO's nye retningslinjer vedrørende udsættelse for helbreds-skadelige luftforureningskomponenter (WHO, 2021a). Figuren er opdelt i retningslinjer vedrørende langtids- og korttidseksponering. Det er de højeste værdier målt ved de danske målestationer, som angives som procent af WHO's retningslinjer, som er indekseret til 100%. De langsigtede retningslinjer er baseret på årsmiddelkoncentrationer og for ozon på parameteren kaldet 'peak season', som beregnes ud fra gennemsnit af den maksimale daglige løbende 8-timersmiddelværdi beregnet for de seks efterfølgende måneder med de højeste værdier. De nye kortsigtede retningslinjer er fastlagt ud fra kalenderårets højeste time-middelværdi, 99%-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 2020, men WHO's retningslinjer for luftkvalitet (2021) overskrides for kvælstofdioxid, PM_{2,5} og PM₁₀ på samtlige gadestrækninger i modelberegningerne.

Helbredseffekter og økonomiske omkostninger af luftforureningen

Modelberegningerne af helbredseffekterne viser, at luftforureningen i 2020 er skyld i omkring 4.000 for tidlige dødsfald og en lang række andre negative helbredseffekter. Antallet af for tidlige dødsfald er omkring 13% lavere end angivet ved den seneste årsrapportering. Dette lavere antal skyldes anvendelse af opdaterede opgørelser over udledningerne, ændring i de anvendte meteorologiske data, det generelle fald i udledningerne og ændringer i udledningerne i 2020 på grund af COVID-19 restriktionerne. Beregningerne viser et fald i helbredseffekterne fra omkring 8.200 tilfælde af for tidlig død per år i 1990 til omkring 4.000 tilfælde per år i 2020. Dette svarer til en reduktion på omkring 51%.

De samlede eksterne omkostninger relateret til luftforurening i Danmark er estimeret til omkring 76 milliarder kr. (2016-priser) for år 2020. De samlede helbredsrelaterede eksterne omkostninger var omkring 115 milliarder kr. (2016-priser) som middel over årene 1988-1990, og er dermed faldet omkring 34% i 2020.

I forbindelse med denne rapportering er der foretaget omfattende beregninger af kilderne til helbredseffekterne og de eksterne omkostninger relateret til luftforureningen i Danmark. Disse beregninger viser, at omkring 860 tilfælde af for tidlig død kan tilskrives udledninger fra danske kilder, hvilket svarer til omkring 21% af det samlede antal for tidlige dødsfald, som følge af luftforureningen i Danmark. De resterende omkring 79% stammer fra udenlandske udledninger, herunder naturlige kilder og international skibstrafik. Tilsvarende fordeling mellem danske og udenlandske udledninger ses for de eksterne omkostninger som følge af luftforureningen. Beregningerne viser også, at danske udledninger er ansvarlig for omkring 1.925 for tidlige dødsfald i udlandet.

Figur 5 og Tabel 1 viser de vigtigste kilders bidrag til antallet af for tidlige dødsfald i Danmark. De vigtigste danske kilder til for tidlige dødsfald er ikke-industriel forbrænding (navnlig boligopvarmning med brænde), som er ansvarlig for omkring 280 tilfælde svarende til omkring 32% af antal tilfælde af for tidlige dødsfald fra danske kilder. Landbrug og vejtransport bidrager med omkring 23% og 20%, og er dermed de næst vigtigste danske kilder.

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



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

Tabel 1. Danske kilders andel af for tidlige dødsfald set i forhold til antallet af for tidlige dødsfald som følge af danske udledninger, samt danske og udenlandske kilders andel set i forhold til antallet af for tidlige dødsfald fra den samlede luftforurening i Danmark, som inkluderer de danske, udenlandske og naturlige kilder. Der er ved beregningerne ikke skelnet mellem naturlige kilder i Danmark og udlandet og da langt størstedelen af bidraget fra naturlige kilder stammer fra kilder uden for Danmark, så 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	6,7	1,3	4,8
Ikke-industriel forbrænding	2	32	6,4	5,5
<i>Handel og service</i>	201	0,7	0,1	-
<i>Husholdninger</i>	202	29	5,7	-
<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	203	2,6	0,5	-
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	3,1	0,6	5,6
Industrielle processer	4	2,7	0,5	1,2
Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	5	0,7	0,1	0,5
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	2,1	0,4	0,5
Vejtransport	7	20	4,0	8,3
<i>Udstødning</i>	701-706	15	2,9	-
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	5,6	1,1	-
Andre mobile kilder	8	7,7	1,5	2,5
Affald	9	1,9	0,4	0,5
Landbrug	3b,d,f-i	23	4,4	12
International skibstransport	-	-	-	13
Naturlige kilder	-	-	-	26
Samlet		100	21	79

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. Da retningslinjerne først blev offentliggjort i september 2021, har det ikke været muligt at indarbejde den nye viden i beregningerne udført i forbindelse med denne årsrapportering. Resultaterne præsenteret i denne rapport angiver derfor sandsynligvis for lave helbredsskadelige effekter, men i hvilket omfang de helbredsskadelige effekter er undervurderet vil det først være muligt at vurdere, når DCE's modelsystem er blevet opdateret med ny konsensusviden fra WHO's anbefalinger.

Summary

This report presents results for 2020 from the Danish monitoring of air quality with focus on the health related effects of air pollution. The air quality monitoring program covers the entire Denmark. However, the monitoring program has special focus on cities, where air pollution and population density are highest. DCE – the Danish Center for Environment and Energy at Aarhus University carries out the monitoring program on behalf of the Danish Ministry of Environment in cooperation with the municipalities of Copenhagen, Odense, Aarhus and Aalborg.

The aim of the monitoring program is to:

- document the state of the air quality in relation to EU's air quality limit and target values,
- determine the long-term trends for the air quality in order to evaluate the impact of the Danish and international measures taken to reduce air pollution,
- warn the Danish public when EU's warning thresholds are exceeded. In Danish context this is only relevant for ozone, and
- determine the health effects and external costs of air pollution in Denmark and 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 (PAHs), 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 2019 emissions, which is the most recent reporting year. An overview of the long-term trends of the emissions is likewise covered. The aim of this overview is to facilitate the interpretation of monitoring results, i.e. explaining the spatial variability and long-term trends of the different air pollutants.

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

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%. Arsenic, nickel and chromium emissions have been reduced with 70-85%. Nitrogen oxides, black carbon and carbon monoxide 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. 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.

For benzo[a]pyrene, it is worth noting that the updated emission inventory now reflects new data on energy consumption in Denmark from the Danish Energy Agency (Energistyrelsen, 2021). These new data shows that the use of wood burning in households has decreased with 35% in the period from 2016 to 2019.

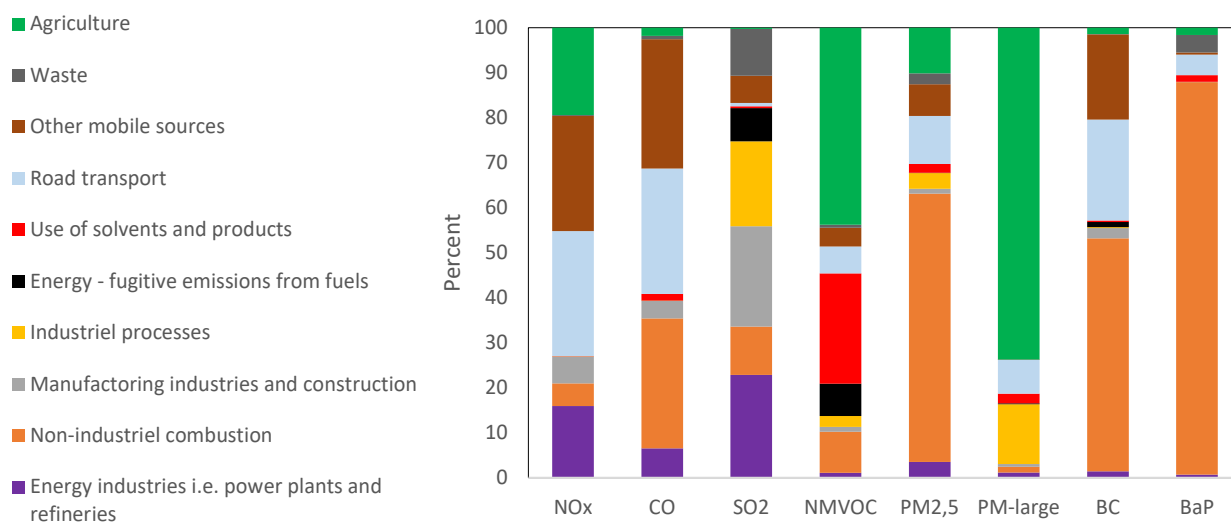


Figure 1. Emissions of selected air pollutants from Danish sources in 2019 grouped in main categories. (Nielsen et al., 2021). The grouping of the sources follows the standards for the international reporting of emissions. The following air pollutants are included: nitrogen oxides (NO_x), carbon monoxide (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.

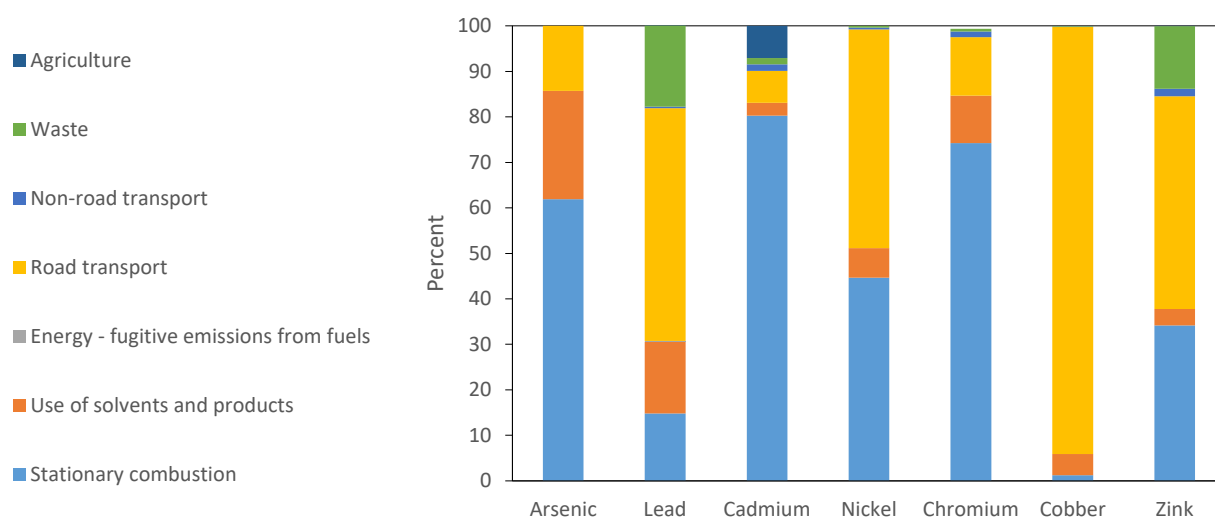


Figure 2. Emissions of selected heavy metals from Danish sources in 2019 grouped in main categories (Nielsen et al., 2021). The grouping of the sources follows the standards for the international reporting of emissions.

State and long-term trends of the air quality

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

The permitted number of exceedances in a year of the diurnal limit value of $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM_{10} was not exceeded at any monitoring station in the monitoring network in 2020. Likewise, there were no exceedances of the annual limit values for PM_{10} ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and $\text{PM}_{2.5}$ ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Model calculations at 98 selected street segments in Copenhagen and 26 selected street segments in Aalborg in 2020 showed likewise no exceedances for annual average concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} . The average exposure indicator (AEI) determined as a running three-year mean of the average urban background concentration of $\text{PM}_{2.5}$ has decreased with about 30% since 2010 and hence the target (15% reduction) has been reached. The annual average concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} have decreased with 30-50% since 2007/2008 and 30-45% 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.

Technical difficulties of recent years with the measurements of particle numbers have now been solved, and hence data from the particle range from 41-478/550 nm as well as 11-478/550 nm can now be analysed. The number of particles in the range 11-478/550 nm was about 8,900 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 2020 the particle numbers for both size fractions have decreased with about 70% and 45% at the street measurement station on H.C. Andersens Boulevard and the urban background measurement station in Copenhagen, respectively. In the rural background at Risø, the particle number has decreased about 40% since 2005 for the fraction 11-478/55 nm and about 50% for the particle fraction 41-478/550 nm.

The limit values for nitrogen dioxide were not exceeded at any of the monitoring stations in Denmark. Model calculations at 98 selected street segments in Copenhagen and 26 selected street segments in Aalborg in 2020 showed likewise no exceedances of the long-term limit value based on the annual average concentration. The annual average concentrations of nitrogen dioxide at the street monitoring stations have been reduced with about 50% since 2005.

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

The annual average concentrations of elemental carbon (EC) were about 0.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at the street measurement station at H.C. Andersens Boulevard while the concentrations were considerably lower in the urban and rural background (0.2-0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). 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 70%) which is in agreement with the emission data.

In 2020, the annual average ozone concentrations were at the same level as in the previous years. No clear trend is observed for the average ozone concentration during the last years. The target value states that the maximum daily 8-hour mean ozone concentration must not exceed 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ more than 25 times annually on average for three years. The target value was not exceeded at any of the monitoring station, 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 except at the street measurement station on H.C. Andersens Boulevard. The target value entered into force in 2010 while the long-term objective has not entered into force and the date for this has not yet been decided. The information threshold of 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ was not exceeded during 2020.

Measurements of volatile organic compounds at the urban background monitoring station in Copenhagen showed concentration levels between 0.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for the selected 17 different compounds. Benzene is the only volatile organic compound with a settled air quality limit value (EU, 2008). In 2020 the annual average concentrations were about 10% of the limit value for the two street measurement stations in Copenhagen. Volatile organic compounds can act as precursors for the formation of ozone, and the aim of these measurements is to improve the general understanding of the ozone formation at a European level. The formation of ozone in Denmark is in general small due to moderate solar radiation. Ozone pollution in Denmark is mainly the result of long-range transport of pollutants from other European

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

Measurements of the concentrations of particle bound polycyclic aromatic hydrocarbons were performed at H.C. Andersens Boulevard, Copenhagen and at the suburban monitoring station at Hvidovre. The annual average concentrations of benzo[a]pyrene were 0.13 ng/m³ and 0.14 ng/m³ at H. C. Andersens Boulevard and Hvidovre, respectively. Hence, the target value for benzo[a]pyrene (1 ng/m³) was not exceeded in 2020. The annual average concentrations have been reduced with about 50-60% at H.C. Andersens Boulevard and Hvidovre since 2008 and 2013, respectively.

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

Figure 3 gives an overview of the air quality in Denmark in relation to the EU limit and target values. There is no exceedance of limit or target values at the Danish measurement stations. The limit values in relation to the short-term exposures have in the EU directive been defined based on a concentration limit that must not be exceeded more than a specified number of times during a calendar year. As an example, the 24-hour average concentration of PM₁₀ must not be exceeded more than 35 times within a calendar year. The percentage given for PM₁₀ (24-hour average) in Figure 3 corresponds to the 36th highest 24-hour average concentration. For 2020 the 36th highest concentration is 67% of the limit value and hence there is no exceedance of the limit value. Figure 3 presents data for the other short-term limit values in a similar way, although the number of allowed exceedances vary for the different limit values.

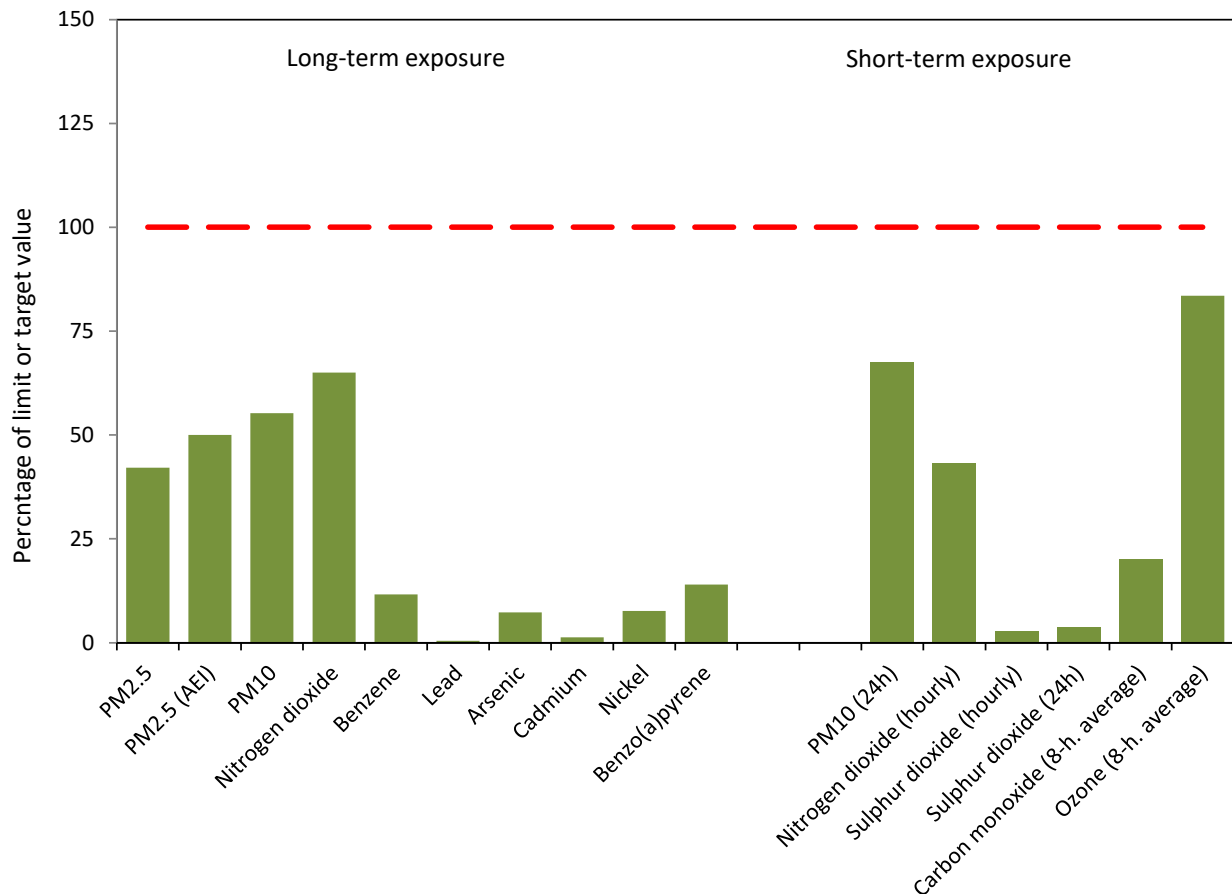


Figure 3. Overview of the Danish compliance with EU's short and long-term limit and target values (EU, 2004; EU, 2008). The long-term limit and target values are based on annual average concentrations while the short-term limit and target values are based on hourly, diurnal or 8-hourly averages. Limit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

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

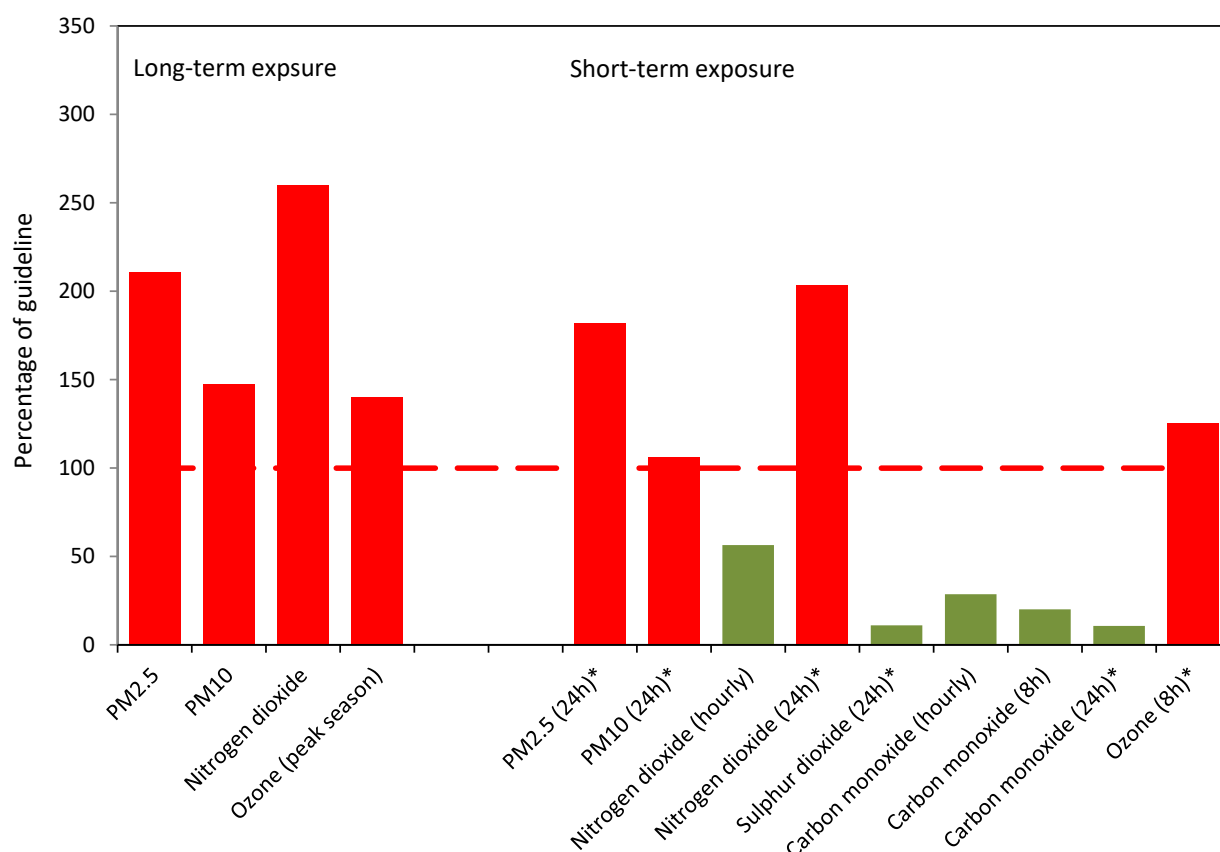


Figure 4. Overview on the exceedances of the new air quality guidelines from WHO (2021a) at the measurement stations in Denmark. The figure is divided according to guidelines regarding long-term and short-term exposure. It is the highest concentrations from the Danish measurement stations that are shown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

Moreover, the model calculations for 98 selected street segments in Copenhagen and 26 selected street segments in Aalborg, give no exceedance of the EU limit values, while the WHO guidelines from 2021 are exceeded for nitrogen dioxide, PM_{2.5} and PM₁₀ on all street segments in 2020.

Health effects and external economic costs of air pollution in Denmark

Model calculations show that air pollution causes about 4,000 premature deaths in Denmark in 2020 and a large number of other negative health effects. This is about 13% less compared to the reporting for 2019. This lower number of premature deaths are due to updates in the emission inventories, meteorological data and changes in emissions due to the COVID-19 restrictions. Calculations of the entire data series back to 1990 show a decrease in the health effects due to air pollution. In 1990, about 8,200 premature deaths were due to air pollution in Denmark which has decreased with about 51% to around 4,000 premature deaths in 2020.

The total health related external costs of air pollution in Denmark have been calculated to 76 billion DKK for 2020 (in 2016-prices). The cost was about 152

billion DKK as a mean over the years 1988-1990 and hence the cost has decreased with about 50% since 1990.

A detailed analysis of the air emission sources of the health effects and external costs in Denmark have been carried out in connection to this reporting. This analysis shows that about 860 premature deaths are due to emissions of air pollution in Denmark. This corresponds to about 21% of the total number of premature deaths. The remaining 79% are due to emissions outside Denmark. The same pattern is seen for the external costs. The model calculations also show that Danish sources are responsible for about 1,900 premature deaths in foreign countries.

Figure 5 shows the contributions from the main air emission source categories to the number of premature deaths in Denmark. The most important Danish air emission source is non-industrial combustion (mainly household warming based on wood burning) responsible for about 280 premature deaths in Denmark corresponding to 32% of the total number of premature deaths due to Danish sources. The Danish non-industrial combustion accounts for about 6% of the total amount of premature deaths in Denmark due to both Danish and international air emission sources.

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

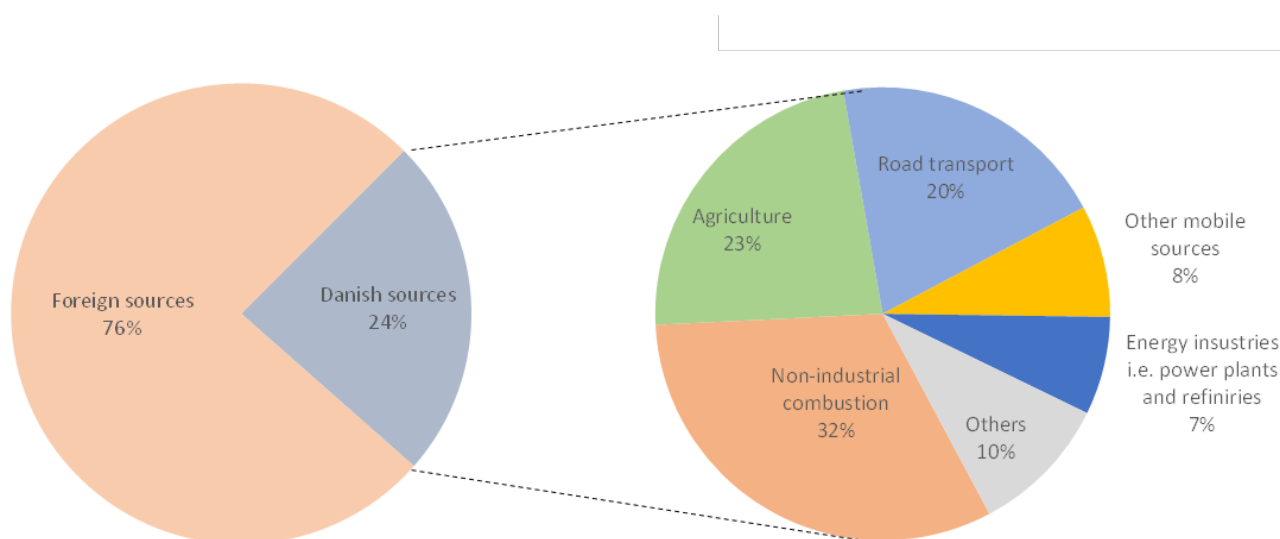


Figure 5. Contribution from Danish and foreign sources to the annual number of premature deaths in Denmark (left) and contributions from Danish sources to the annual number of premature deaths in Denmark (right). For the Danish sources, the five most important categories are shown while the remaining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

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

Categori	SNAP-code	Danish sources relative to the total contribution from Danish sources	Danish sources relative to the total air pollution in Denmark	Foreing sources relative to the total air pollution in Denmark
		%	%	%
Energy industries i.e. power plants and refineries	1	6,7	1,3	4,8
Non-industrial combustion	2	32	6,4	5,5
<i>Commercial and institutional</i>	201	0,7	0,1	-
<i>Households</i>	202	29	5,7	-
<i>Agriculture, forestry and aquaculture</i>	203	2,6	0,5	-
Manufacturing industries and construction	3	3,1	0,6	5,6
Industrial processes	4	2,7	0,5	1,2
Energy - fugitive emissions from fuels	5	0,7	0,1	0,5
Use of solvents and products	6	2,1	0,4	0,5
Road transport	7	20	4,0	8,3
<i>Exhaust</i>	701-706	15	2,9	-
<i>Non-exhaust</i>	707-708	5,6	1,1	-
Other mobile sources	8	7,7	1,5	2,5
Waste	9	1,9	0,4	0,5
Agriculture	3b,d,f-i	23	4,4	12
International shipping	-	-	-	13
Natural sources	-	-	-	26
Total		100	21	79

WHO's new guidelines (WHO, 2021a) also encompass a thorough review of the international research on the association between exposure to a number of air pollutants and effects on human health. The review documents that the health impacts are larger than previously known and that the impacts on human health are observed at lower concentration levels than previously documented. These guidelines were published in September 2021 and it has therefore not been possible to include the new knowledge in this annual report. The results presented above are therefore most likely underestimated. It is not possible to estimate the extend of this underestimation before DCE's model system has been updated with the new consensus knowledge from WHO's guidelines (WHO, 2021a).

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 2020) har fokus på overvågning af tilførslen af luftforurening til vandmiljøet og naturen. Rapporten om den atmosfæriske deposition forventes offentliggjort i december 2021 i sammenhæng med den øvrige rapportering under NOVANA.

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

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

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

- Dokumentation af status for luftkvaliteten i Danmark, herunder vurdering af overholdelse af EU's luftkvalitetskriterier angivet i de to luftkvalitetsdirektiver (EU, 2004; EU 2008). Luftkvalitetskriterierne er angivet i form af grænseværdier, målværdier, langsigtet målsætning og nationalt reduktionsmål, hvor grænseværdierne er de juridisk set mest bindende. 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 præsenteres resultaterne fra beregning af helbredseffekterne af luftforureningen og de økonomiske effekter af disse. Dette kapitel omfatter også resultater fra beregning af kilderne til helbredseffekterne. Inden præsentationen af selve resultaterne gives en kort introduktion til opgørelserne af udledningerne, målenetværket, målemetoderne og modelberegningerne.

WHO offentliggjorde i september 2021 nye retningslinjer for luftkvaliteten for de mest sundhedsskadelige luftforureningskomponenter (kvælstofdioxid, carbonmonoxid, svovldioxid, ozon, PM_{2,5} og PM₁₀; WHO, 2021a). De nye retningslinjer fra WHO ligger væsentligt lavere end de hidtidige retningslinjer fra 2006. I det sidste kapitel sammenlignes luftkvaliteten i Danmark i 2020 med både de gamle og nye retningslinjer fra WHO.

2020 var for Danmark og resten af verden præget af COVID-19-pandemien som satte begrænsninger for samfundsaktiviteterne på globalt plan. Danmark og de fleste andre lande indførte omfattende restriktioner for at begrænse udbredelsen af pandemien, hvilket gav anledning til reducerede udledninger af luftforurening, hvilket især var gældende for transportsektoren i foråret 2020. De reducerede udledninger har påvirket luftforureningsniveauerne i 2020, men på trods af de omfattende restriktioner, så er det danske vejtrafikindeks for eksempel kun faldet med 7% fra 2019 til 2020 (Danmarks Statistik, 2021). For hovedparten af de målte luftforureningskomponenter har det derfor vist sig umuligt at adskille effekten af COVID-19-restriktionerne fra de ændringer, som er sket fra 2019 til 2020 som følge af den generelle udviklingstendens (den ændring, som ville være sket, hvis der ikke havde været COVID-19-restriktioner) og de naturlige variationer i de meteorologiske forhold fra år til år. Derfor er der i forbindelse med denne rapport ikke lavet nye detaljerede undersøgelser af effekten af COVID-19-restriktionerne på luftkvaliteten i Danmark. De hidtidige undersøgelser kan findes via følgende link: [Corona- nedlukningens indflydelse på luftkvaliteten i Danmark i 2020 \(au.dk\)](#) og [SR450.pdf \(au.dk\)](#). I forbindelse med modelberegningerne er der dog anvendt en række

korrektioner for at kunne tage hensyn til COVID-19-restriktionernes indvirkning på udledning af luftforurening i 2020 (se afsnit 1.4).

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 landbrugsstatistikken 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., 2021).

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-industriel forbrænding og vejtransport.

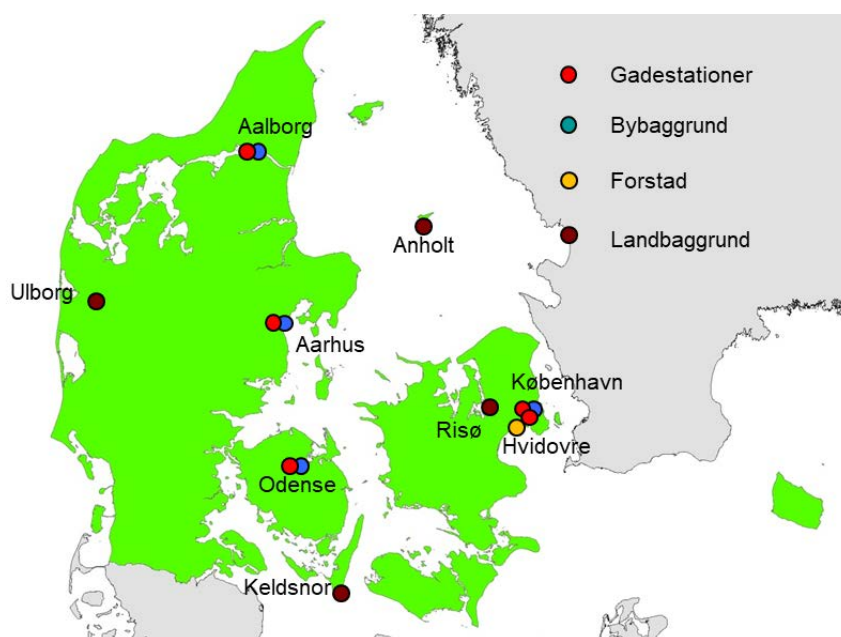
Kategori	Beskrivelsen
Energiindustri	Kraftvarmeværker, raffinaderier og energiforbrug til udvinding af olie og gas
Ikke-industriel forbrænding	Stationær forbrænding i nedenstående kategorier
- handel og service	f.eks. hospitaler, universiteter
- husholdninger	f.eks. brændeovne, oliefyr, naturgasfyr
-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

Der er udarbejdet tidsserier for udviklingen i udledningerne, som for alle luftforureningskomponenter går tilbage til 1990. Enkelte går længere tilbage, for eksempel tidsserien for svovldioxid, som går tilbage til 1980. De nationale opgørelser bliver årligt forbedret på basis af ny internationalt anerkendt viden. Opgørelserne for 2019 blev også forbedret på visse områder, hvilket er dokumenteret i Nielsen et al. (2021). I forbindelse med forbedringer af opgørelserne bliver hele tidserien genberegnet, således at der forligger konsistente tidsserier for udledningerne.

Baseret på opgørelserne foretages en geografisk fordeling af udledningerne som input til modelberegningerne. Dette foretages i SPREAD-modellen (Plejdrup et al., 2018), 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 2020 (Figur 1.1). Det er kun disse 14, som vil blive omtalt i det følgende.



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

Målestationerne er inddelt i fire kategorier:

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

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

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

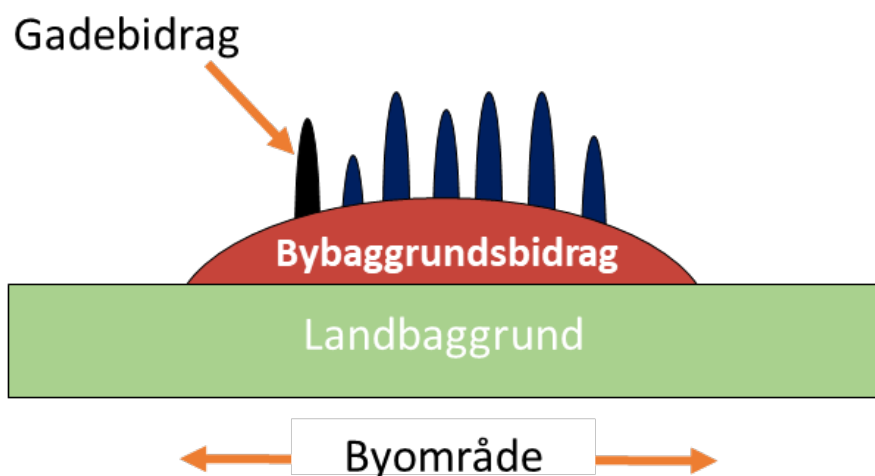
Gademålestation: Målestation placeret i stærkt trafikeret gade.

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

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

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

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



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

Målestationerne er meget forskellige i størrelse og antal målte parametre. Målestationen på H.C. Andersens Boulevard er den største målestation, hvor næsten alle parametre måles. Tilsvarende måles næsten alle parametre ved landbaggrundsmålestationen ved Risø. Denne tilgang er valgt for så vidt muligt at opnå et komplet billede af luftforureningen ved disse to nøglemålestationer. Lige så vigtigt har det været 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						
Aalborg, Vesterbro	x	x	x				x							
<i>Bybaggrund</i>														
København, H.C. Ørsted Instituttet	x	x		x	x	x	x	x	x	x		x		
Odense, Rådhus	x					x								
Aarhus, Botanisk Have	x					x	x							
Aalborg, Østerbro	x					x	x							
<i>Forstad</i>														
Hvidovre	x						x		x	x	X		x	
<i>Landbaggrund</i>														
Risø	x	x	x			x	x	x	x	x	X	x		x
Anholt	x		x									x		
Keldsnor	x		x			x		x						
Ulborg	x		x			x								
Samlet antal	14	7	6	1	3	8	9	7	4	4	3	5	2	1

1.3 Målemetoder

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

Tabel 1.3. Oversigt over anvendte metoder.

Luftforureningskomponent	Metode
<i>Gasser</i>	
Kvælstofdioxid og kvælstofoxider	NO _x -monitor, kemiluminescens (online data)
Ozon	O ₃ -monitor, UV-absorption (online-data)
Carbonmonoxid	CO-monitor IR-absorption (online data)
Svovldioxid	SO ₂ -monitor, UV-fluorescens (online data) og filterpack-opsamler på landbaggrundsmålestationerne
Benzen, toluen og xylener	Passiv opsamling og analyse med GC-MS
Flygtige organiske forbindelser	Opsamling på pakkede rør og analyse med GC-MS**
<i>Partikler</i>	
Fine partikler (PM _{2,5})	Opsamling af PM _{2,5} på partikelfilter (low volume sampling) og gravimetrisk måling af partikelmasse
Fine+grove partikler (PM ₁₀)	Opsamling af PM ₁₀ på partikelfilter (low volume sampling) og gravimetrisk måling af partikelmasse
Partikelantal (41 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 total suspended particulate (op til 14-20 µm)

**Rørene er pakket med Carbopack X.

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

1.4 Modelberegninger

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

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

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

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

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

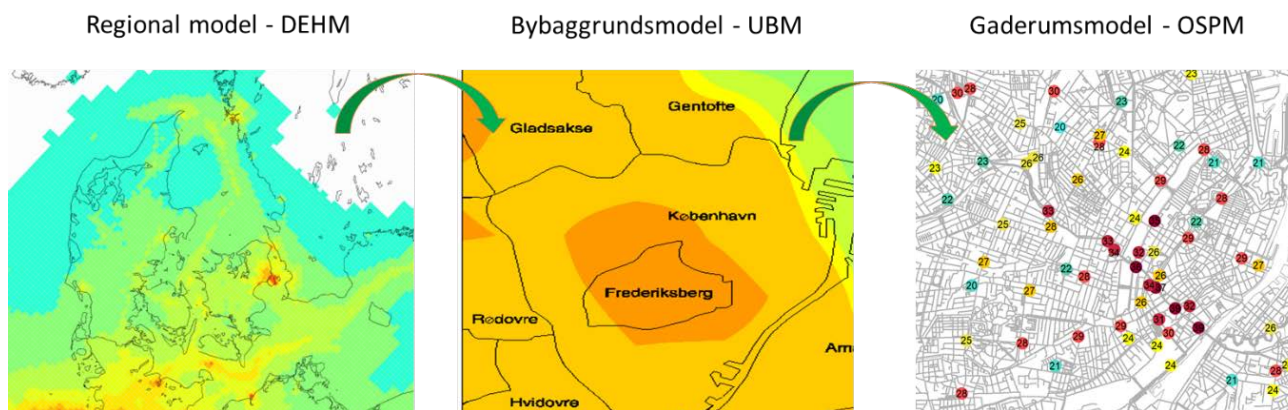
DEHM (Danish Eulerian Hemispheric Model): Denne model dækker hele den nordlige halvkugle og anvendes til beskrivelse af luftforureningen på stor geografisk skala. Modelberegningerne inkluderer beskrivelse af udledningerne, den atmosfæriske transport, de kemiske og fysiske processer i atmosfæren samt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

UBM (Urban Background Model): Oprindeligt var denne model kun beregnet til at beskrive luftforureningen i baggrundsområder i byer, men i de senere år 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 25 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), 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 trafikudlednings-modellen COPERT 5. Resultater fra UBM indgår som input til OSPM. Modellen er dokumenteret i Berkowicz (2000a) og Ketzel et al. (2012).

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

Modellsystemet bliver ligeledes anvendt til at beregne koncentrationer af luftforurening på samtlige 2,5 millioner adresser i Danmark. Disse modelberegninger indgår også i Delprogram for luft under NOVANA, hvor der er udarbejdet nye opdaterede beregninger for 2019, som blev offentliggjort i maj 2021. De hidtidige modelberegninger var for 2012. 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 2019 fra DCE (<https://envs.au.dk/en/research-areas/air-pollution-emissions-and-effects/air-emissions/>; Nielsen et al., 2021) og internationale emissionsopgørelser for 2018 fra EMEP (www.emep.int). Disse data er de mest opdaterede tilgængelige emissionsdata. For Danmark er emissionerne geografisk fordelt ud fra forskellige geografiske fordelingsnøgler med SPREAD-modellen 3.0 (Plejdrup et al., 2021). Udledningsmodulet i OSPM er baseret på COPERT 5-emissionsmodel.

De omfattende COVID-19-restriktioner i Europa har medført en betydelig ekstraordinær reduktion af udledningerne af luftforurening i 2020. For bedst muligt at tage hensyn til dette, er der foretaget en korrektion af danske og EMEP baseret udledningerne for 2020. Korrektionerne er baseret på ændringer af udledninger fra trafik og industri for månederne marts-maj, som er beskrevet i Barre et al. (2021), hvor de danske trafikudslip antages at være reduceret med 40%, mens udslip fra industri antages reduceret med 17%.

Udledningerne for skibe er ligeledes ændret i forhold til tidligere modelberegninger. Ved modelberegningerne præsenteret i denne årsrapportering baseres udledningerne på det globale datasæt fra det Finske Meteorologiske 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. Datasættet bruger AIS-information for årene 2014-2020 og tager hensyn til ændringer i bl.a. svovlindhold i skibsbrændstof. Før 2014 er skibsemissionerne fastlagt på basis af ekstrapolering bagud i tid baseret på informationer om ændringer i flådestørrelse, energiforbrug, skibsstørrelser m.m. Den rumlige opløsning er $0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$ svarende til ca. 7 km x 11 km (hhv. Ø-V og N-S) i det danske område med en tidslige opløsning på månedsbasis. Derudover bliver den rumlige fordeling genfordelt for havområderne omkring Danmark ved brug af et specielt STEAM-udledningsdatasæt for 2016 med høj rumlig opløsning på 1 km x 1 km, hvilket hovedsageligt flytter eventuelle skibsudledninger over land til havområder og opkoncentrerer udledningerne for færge- og skibsruter. Fordelen med det nye datasæt er, at man tager hensyn til variationen af skibsaktiviteterne imellem de enkelte år og de enkelte måneder, hvilket især har haft betydning i 2020 på grund af COVID-19-restriktionerne.

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.

Modelsystemet opdateres lejlighedsvist i forbindelse med forskningsfremskridt på området, og når der foreligger nyt forbedret datagrundlag. I forbindelse med modelberegningerne for 2020 har det været nødvendigt at fortage følgende opdateringer:

- Den geografiske fordeling af de danske emissioner er baseret på version 3.0 af SPREAD-modellen mod tidligere version 2.0.

- Udledningerne for skibstrafik i nærheden af Danmark er nu baseret på et projekt udført sammen med FMI (Finsk Meteorologisk Institut) kombineret med opdaterede udledningsfaktorer fra det såkaldte EPITOME projekt (Geels et al., 2021). Herigennem er der skabt et geografisk fordelt datasæt, som indeholder både nationale og internationale søtransportudledninger. Udledningerne for skibstrafik i nærheden af Danmark var tidligere baseret på en særskilt opgørelse, som DCE oprindeligt udarbejdede med høj geografisk opløsning i 2009 (Olesen et al., 2009).

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

Kvaliteten af resultaterne fra modelberegningerne vurderes løbende ved sammenligning mellem model- og måleresultater (Bilag 1). På basis af denne sammenligning vurderes også behovet for en eventuel justering af modelresultaterne, således at der opnås forbedret overensstemmelse mellem modelresultater og målinger. For 2020 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 PM₁₀), 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

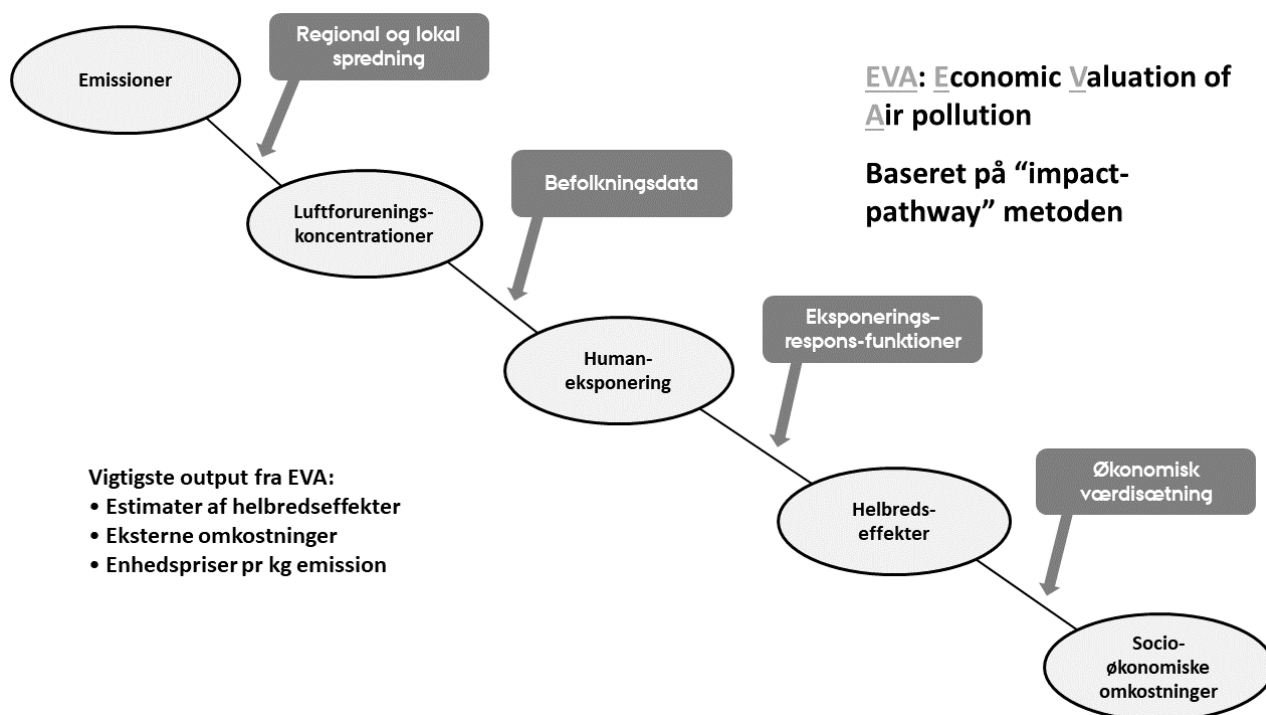
Modelberegninger af helbredseffekter og eksterne omkostninger af luftforurening har været en vigtig del af overvågningsprogrammet siden 2016. Disse beregninger foretages med EVA-modelsystemet (Economic Valuation of Air Pollution), som baseres på den såkaldte Impact-pathway metode (Figur 1.4), hvor nedenstående 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 baseres på data fra CPR-registret for 2017.

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 anbefalet i regi af WHO (WHO, 2013).

Endeligt beregnes de eksterne omkostninger af luftforureningen ud fra en økonomisk værdisætning af de forskellige helbredseffekter, som er inkluderet i EVA-modellen.



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

Modelsystemet blev væsentligt opdateret i forbindelse med modelberegningerne for 2018, hvilket er beskrevet i Ellermann et al. (2019) og Andersen et al. (2019), som også giver flere detaljer om eksponerings-responsfunktionerne. De vigtigste opdateringer drejede sig om:

- EVA-modelsystemet blev udvidet med de direkte helbredseffekter fra eksponering for kvælstofdioxid og akutte effekter fra de fine partikler (Andersen et al., 2019).
- Modelberegningerne af de økonomiske omkostninger blev væsentligt opdateret ved at inkludere den opdaterede økonomiske værdisætning for statistisk liv. Denne værdisætning er udarbejdet af Det Økonomiske Råd (DØRS, 2016) og Finansministeriet (2017).

EVA-modelsystemet og de forskellige elementer i beregningerne er grundigt dokumenteret i Brandt et al. (2015, 2016). 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, 2019) og Bach et al. (2006). Systemet er også sammenlignet med andre tilsvarende modeller i internationale studier (Anenberg et al., 2016; Lehtomaki et al., 2020).

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 2020 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

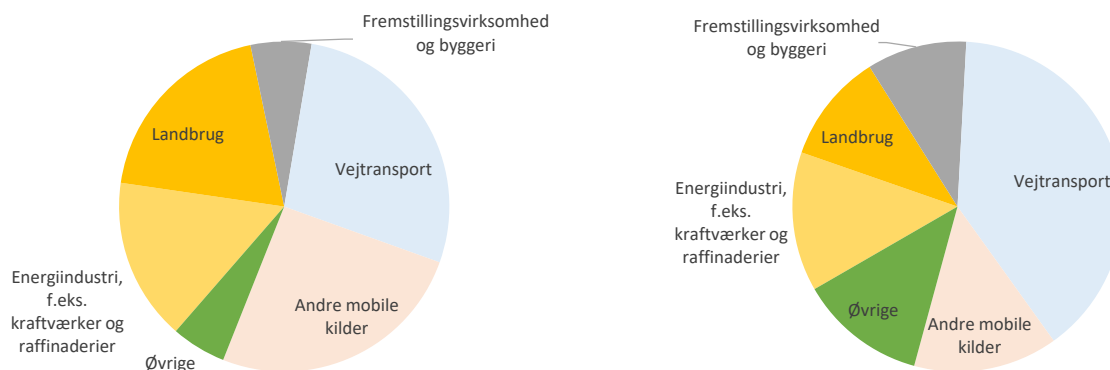
Den væsentligste kilde til udledning af kvælstofoxider (NO_x) er forbrænding. Der udledes en blanding af kvælstofdioxid og kvælstofmonoxid, som varierer mellem de forskellige typer af forbrænding og efterfølgende renselsesudstyr. Derfor er det kutyme at angive udledningerne af de to gasser i form af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

I 2019 kom den største andel af de danske udledninger af kvælstofoxider fra vejtransport (Figur 2.1 og Tabel 2.1; Nielsen et al., 2021). Andre mobile kilder bidrager med en næsten lige så stor andel, mens landbrug og forbrændingssektoren (energi og opvarmning) er tredje- og fjerdestørste kilde. Det samlede bidrag fra mobile kilder udgør næsten 60% af de samlede danske udledninger.

De samlede udledninger af kvælstofoxider er faldet med omkring 67% siden begyndelsen af 1990'erne (Figur 2.2; Nielsen et al., 2021). Det største fald er sket for forbrændingssektoren (omkring 83%), som i begyndelsen af 1990'erne var den største kilde sammen med vejtransportsektoren. Udledningerne fra vejtransport er også faldet betydeligt (omkring 75%), 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

DeNOx)) 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.

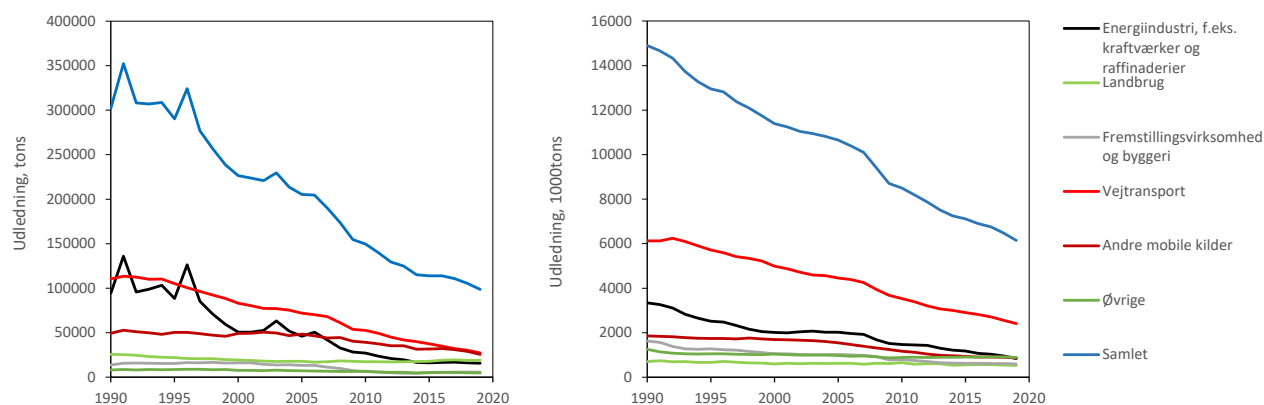


Figur 2.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af kvælstofoxider i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2019. Figureerne viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2021, CEIP, 2021).

Tabel 2.1. Kilderne til de menneskabte udledninger af kvælstofoxider i Danmark i 2019 (Nielsen et al., 2021). 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 2019	
		Tons	%
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	15695	16
Ikke-industriel forbrænding	2	5013	5
<i>Handel og service</i>	201	658	1
<i>Husholdninger</i>	202	3760	4
<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	203	596	1
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	5862	6
Industrielle processer	4	25	0
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	5	0	0
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	42	0
Vejtransport	7	27436	28
<i>Udstødning</i>	701-706	27436	28
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	0	0
Andre mobile kilder*	8	25191	26
Affald	9	205	0
Landbrug	3b,d,f-i	19146	19
Samlet		98617	100

* Data inkluderer national søfart, al flyvning under 3000 fod, togtrafik, også 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., 2021; CEIP, 2021). 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 2020. Årsmiddelmiddelværdierne ligger ved alle målestationer under grænseværdien på 40 µg/m³, der er fastsat af hensyn til langtidseffekter (årsmiddelværdien af kvælstofdioxid, må ikke overskride 40 µg/m³ i et kalenderår (EU, 2008)). Selv ved den mest forurenede gademålestation (H.C. Andersens Boulevard) var årsmiddelværdien næsten 35% under grænseværdien.

Grænseværdien af hensyn til korttidseksponering for kvælstofdioxid er baseret på timemiddelværdier, hvor antallet af timer med timemiddelværdier over 200 µg/m³ ikke må overskride 18 i et kalenderår. Af tabel 2.2 fremgår, at den maksimale timemiddelværdi ved alle målestationer lå et godt stykke under 200 µg/m³. I forhold til grænseværdien var timemiddelværdierne af kvælstofdioxid meget lave, og der var ingen overskridelse af grænseværdien for timemiddelværdien af kvælstofdioxid i 2020.

Der er dermed ingen overskridelse af de to grænseværdier for kvælstofdioxid i 2020.

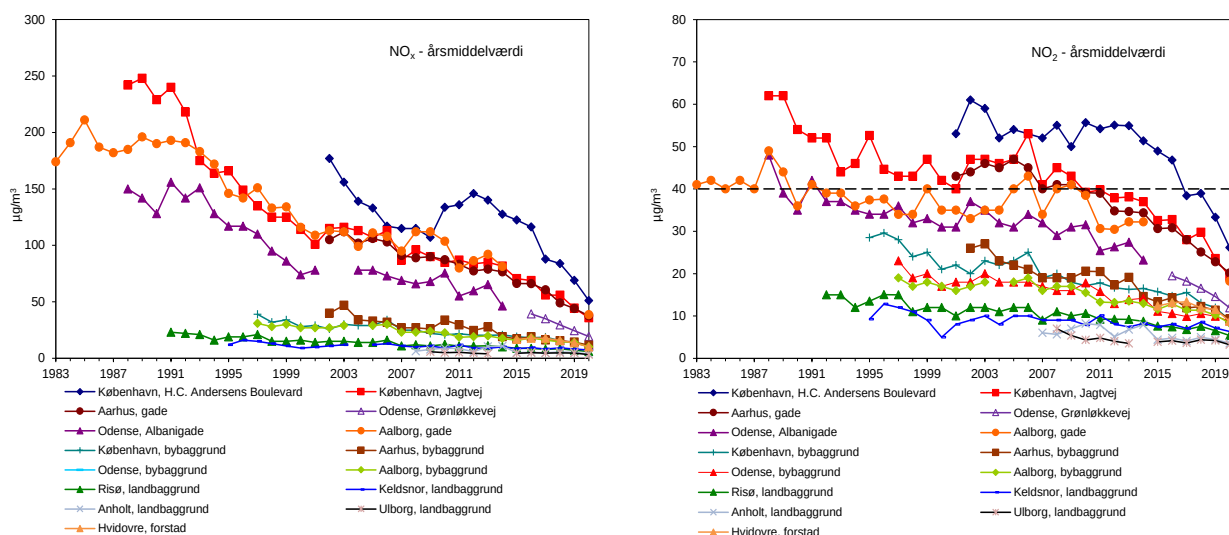
Tabel 2.2. Årsmiddelkoncentrationer for kvælstofdioxid (NO₂) og kvælstofoxider (NO_x) i 2020, samt højeste timemiddelværdi for kvælstofdioxid. Endvidere vises grænseværdierne for kvælstofdioxid, der er baseret på årsmiddelværdi og timemiddelværdi, hvor timemiddelværdi højst må overskride 200 µg/m³ 18 gange på et kalenderår (EU, 2008). Kvælstofoxider angives i ækvivalenter af kvælstofdioxid (µgNO₂/m³), hvilket er standard i forbindelse med EU's luftkvalitetsdirektiv (EU, 2008).

	NO ₂ Årsmiddelværdi µg/m ³	NO ₂ Højeste timemiddelværdi µg/m ³	NO ₂ Antal gange med timemiddelværdi over 200 µg/m ³ antal gange	NO _x Årsmiddelværdi µg NO ₂ /m ³
Grænseværdi	40	200	18	
<i>Gade</i>				
København, H.C. Andersens Boulevard	26	113	0	51
København, Jagtvej	19	90	0	36
Odense, Grønløkkevej	12	84	0	19
Aarhus, Banegaardsgade	20	133	0	38
Aalborg, Vesterbro	18	120	0	39
<i>Bybaggrund</i>				
København	9,0	67	0	11
Odense	8,8	67	0	10
Aarhus	9,3	81	0	12
Aalborg	8,3	66	0	10
<i>Forstad</i>				
Hvidovre	8,7	77	0	10
<i>Landbaggrund</i>				
Anholt	3,6	62	0	3,9
Keldsnor	6,3	82	0	7,3
Risø	5,4	49	0	5,9
Ulborg	3,2	30	0	3,2

For kvælstofdioxid ses en væsentlig forskel mellem de målte koncentration-niveauer ved de fire 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 (12-26 µg/m³), bybaggrund (8-9 µg/m³), forstad (9 µg/m³) og på de landlige baggrundsmålestationer (3-6 µg/m³). I gennemsnit for gademålestationerne, så kommer omkring 50 % fra gadebidraget, omkring 15 % fra bybaggrund og 35 % fra landbaggrund. Årsagen til denne fordeling er, at kvælstofoxiderne lever relativt kort tid i luften før de omdannes til en anden luftforureningskomponent eller bliver fjernet fra luften via deposition. Dette giver relativt store variationerne i koncentrationerne og et relativt stort bidrag fra de lokale kilder (her trafikken).

2.3 Udviklingstendens

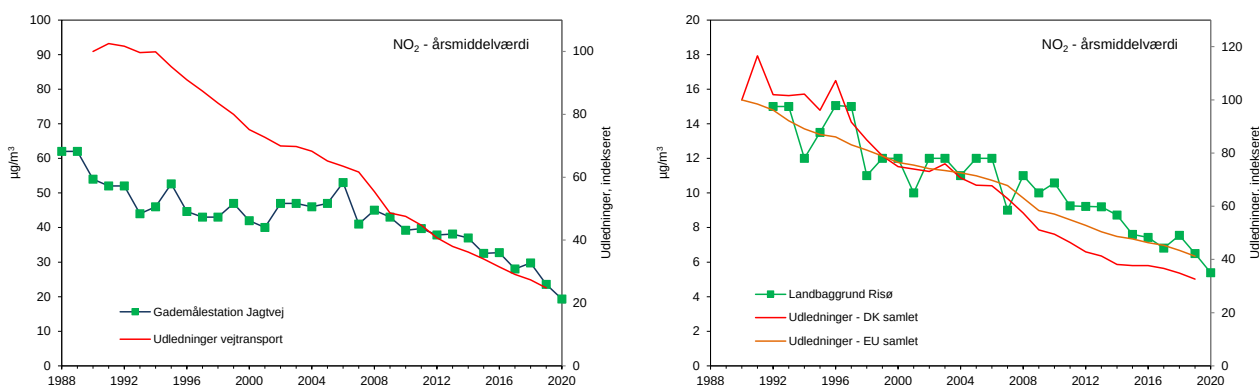
Figur 2.3 viser udviklingsendenserne for årsmiddelværdierne af kvælstofoxiderne (NO_x) og kvælstofdioxid (NO₂). For kvælstofoxiderne ses et markant fald siden målingernes begyndelse i 1983. For gademålestationerne er der sket et fald på omkring 80% siden opstart af målingerne. For kvælstofdioxid ses et meget anderledes udviklingsforløb med et svagt fald i 1980'erne og begyndelsen af 1990'erne, som efterfølges af stort set uændrede niveauer i slut 1990'erne og begyndelsen af 2000'erne. Fra omkring 2005 og til i dag er der til gengæld sket en markant reduktion i luftkoncentrationerne af kvælstofdioxid på op mod 50%.



Figur 2.3. Udviklingstendens for årsmiddelværdier af NO_x (venstre) og NO_2 (højre). For NO_2 angiver den stiplede linje EU's grænseværdi (EU, 2008). Det markant anderledes forløb, som ses for H.C. Andersens Boulevard (navnlig for NO_x), skyldes omlægning af vejbanerne på H.C. Andersens Boulevard i 2010, som flyttede trafikken tættere på målestationen (for yderligere detaljer se Ellermann et al., 2020). Bemærk at årsmiddelværdierne for NO_x angives i ækvivalenter af NO_2 ; $\mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$.

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 00'erne ses et væsentligt mindre fald i målte koncentrationer sammenholdt med faldet i udledninger. Årsagen til forskellen er ændringer i køretøjssammensætning med stigende andel af dieselskøretøjer og stigende andel af oxiderende katalysatorer på dieselskøretøjerne. Disse ændringer har i samspil med de kemiske reaktioner i atmosfæren resulteret i, at de faktiske luftkoncentrationer stort set er uændret i perioden. Fra omkring midten af 00'erne og fremefter indførtes i stadig stigende grad dieselskøretøjerne med katalysatorer, som stærkt begrænser udledningerne af kvælstofoxider fra dieselskøretøjerne, hvilket fører til det relativt store fald i luftkoncentrationerne fra omkring 2005 og frem. I denne periode ses god overensstemmelse med faldet i luftkoncentrationerne og udledningerne fra vejtransporten. Ændringerne i udledningerne spiller derfor den største rolle for ændringerne i luftkoncentrationerne, selv om ændringer i kemiske reaktioner mellem kvælstofoxiderne og ozon også spiller ind.

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



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 (højere akse, indekseret til 100 i 1990) (Nielsen et al., 2021). 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 fire miljøzonebyer i Danmark. Effekten af de skærpede miljøzoner vedtaget i 2019 er indregnet. De skærpede krav omfatter per 1. juni 2020, at alle busser skal være mindst Euro 5 (både bybusser og turistbusser) og dieselvarebiler skal være mindst Euro 4. Da emissioner i emissionsmodulet til gadeluftkvalitetsmodellen OSPM er beskrevet som årlige emissioner, har vi implementeret det ved at antage, at disse krav gælder for hele 2020.

Nedlukningen den 11. marts 2020 og efterfølgende restriktioner i forbindelse med corona førte til et kraftigt fald i trafikken lige efter nedlukningen i marts, men trafikken vente langsomt tilbage hen over forår og sommeren 2020 ifølge Vejdirektoratet. Det er antaget, at det kun er personbiltrafikken, som er påvirket, da der kun var mindre ændringer for vare- og lastbiltrafikken. Det er også antaget, at bustrafikken er uændret. Samlet set reduceres trafikken med 5%, hvilket er samme niveau, som Vejdirektoratets estimerer for kommuneveje (Vejdirektoratet, 2021). På baggrund af analyse af trafikken i løbet af 2020 på 30 tællesteder fra Vejdirektoratet er der opstillet en sæsonvariation for trafikken, som er anvendt i gadeluftkvalitetsberegningerne med OSPM. De trafikmålinger, som er anvendt, er lavet uden for den periode, som er påvirket af coronarestriktioner. Derfor revideres sæsonvariation mht. ovennævnte reduktion i personbiltrafikken for at sikre en præcis beskrivelse af trafikken over året, og hvordan den påvirker luftkvaliteten.

Tilsvarende er der antaget reduktioner i udledninger fra fremstillingsvirksomhed, industrielle processer og transport i danske og europæiske udledninger i marts, april og maj baseret på statistiske oplysninger om energiforbrug.

2.4.1 Modelberegninger for København

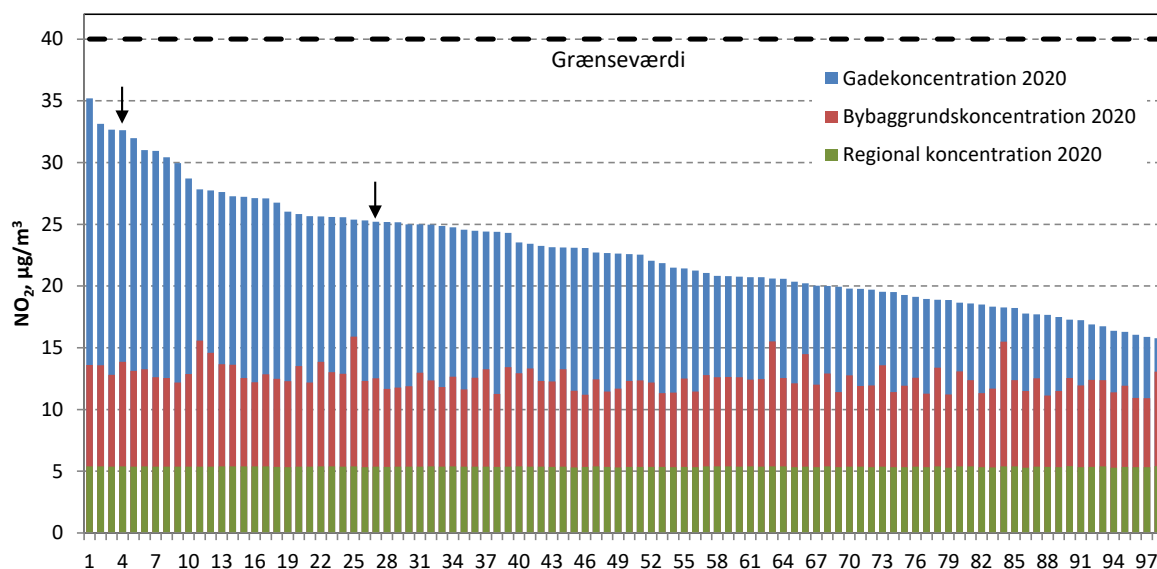
Årsmiddelkoncentrationen af kvælstofdioxid for gadestrækninger i København i 2020 vises i Figur 2.5 som søjlediagram og i Figur 2.6 som kort. Gennemsnittet af årsmiddelkoncentrationerne for kvælstofdioxid i alle 98 gadestrækninger faldt fra 2019 til 2020 med omkring $2,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, heraf er omkring $2,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pga. reduktion af bybaggrundskoncentrationen. Målingerne på H.C. Andersens Boulevard og Jagtvej i København viser også et fald i årsmiddelkoncentrationerne af kvælstofdioxid fra 2019 til 2020, og det samme er tilfældet for bybaggrundsstationen på H.C. Ørsted Institut og landstationen på Risø. Reduktionen i gadekoncentrationerne er et resultat af en kombination af ændringer i trafikken, udledningsfaktorer, baggrundskoncentrationer og meteorologi.

ÅDT (årsdøgntrafik - dvs. gennemsnitlig døgntrafik over et år) var mellem 5.000 og 81.000 køretøjer om dagen i København. Den gennemsnitlige trafik for de 98 gader var stort set uændret fra 2019 til 2020 dog med et lille fald i den gennemsnitlige trafik på 1 % og et lille fald i andelen af tunge køretøjer fra 4,4 % til 4,1 %, hvilket alt andet lige fører til lidt lavere 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. Den direkte andel af kvælstofdioxid i udstødningen (den procentvise andel af kvælstofdioxid set i forhold til den samlede udledning af kvælstofoxider) er også faldet en smule fra 13 % i 2019 til 11 % i 2020, hvilket relativt set har ført til lidt lavere modelberegnete koncentrationer af kvælstofdioxid.

Alt i alt er der sket et fald i gadekoncentrationerne pga. forbedring af køretøjerne (lavere udledningsfaktorer), men også fordi både bybaggrundskoncentrationen er faldet som følge af lavere udledninger i København, og fordi det regionale bidrag er faldet pga. lavere udledninger i Danmark og udlandet.

I 2020 er der ingen modelberegnete overskridelser af grænseværdien for årsmiddelkoncentrationen for de 98 udvalgte gadestrækninger i København (Figur 2.5). Der blev heller ikke modelberegnet overskridelser i 2019, men én meget lille overskridelse i 2018, og ingen i 2017. Resultaterne fra modelberegningerne er i overensstemmelse med måleresultaterne, hvor der heller ikke blev observeret overskridelser i 2020, men modelberegningerne overestimerer dog generelt i forhold til målinger, se Bilag 1.



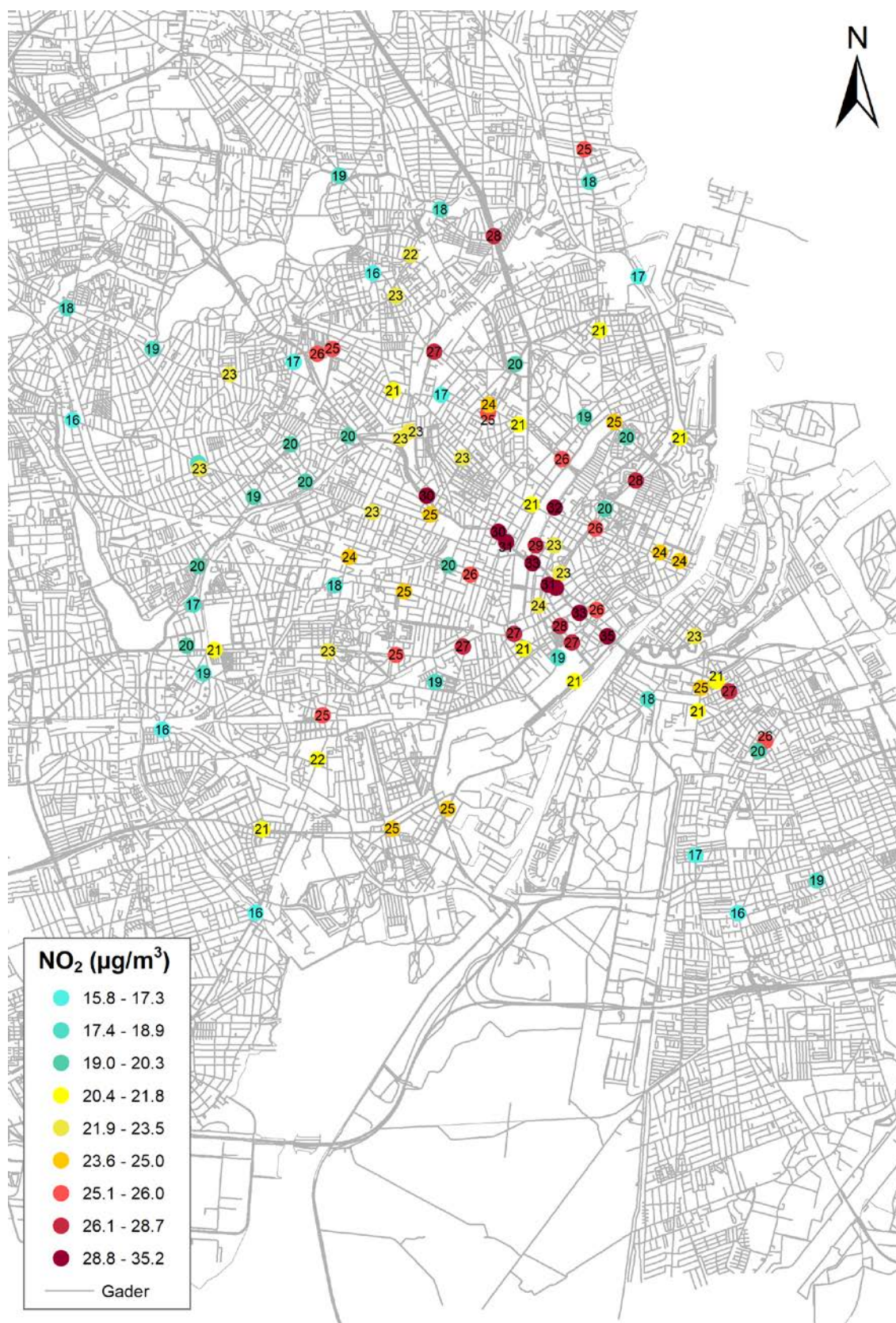
Figur 2.5. Årsmiddelkoncentrationer for kvælstofdioxid i 2020 for 98 udvalgte gadestrækninger i København baseret på modelberegninger. Bidraget fra trafikken i gaderne er baseret på gadeluftkvalitetsmodellen OSPM® (blå farve). Bybaggrundsbidraget (røddlig farve) er baseret på beregninger med baggrundsmodellen UBM med input fra den regionale langtransportmodel DEHM (grøn farve). Værdien for en gadestrækning er for den side af gaden, der har den højeste årsmiddelkoncentration af de to sider. Men for gader med en målestation er det den side, hvor stationen er placeret. Navnene på gaderne kan ses i tabel 2.3. Pile angiver gadestrækninger med en målestation.

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

Der er sket mindre ændringer i rangordningen af gaderne fra 2019 til 2020, hvilket primært er på grund af små ændringer i trafikken. Den højeste modelberegnete årsmiddelkoncentration for kvælstofdioxid i 2020 var på H.C. Andersens Boulevard (2) med $35,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Den fjerde højeste er, hvor målestationen er placeret på H.C. Andersens Boulevard, mens årsmiddelkoncentrationen er den 27. højeste ved målestationen på Jagtvej. I forhold til WHO's nye retningslinjer for luftkvalitet på $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for årsmiddelværdien af NO_2 (WHO, 2021a) er der overskridelser på samtlige gader i København.

Tabel 2.3. Rangnummer og navne for gadestrækninger, der er vist i figur 2.5 og 2.6. Gaderne er nummererede (1-98) i forhold til kvælstofdioxidniveauerne i 2020 (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	Amagerfælledvej	67	Hillerødgade(3)
2	H C Andersens Boulevard(3)	35	Gammel Kongevej(1)	68	Englandsvej(1)
3	Gyldenløvesgade	36	Tagensvej(3)	69	Ålholmvej(1)
4*	H C Andersens Boulevard(1)	37	Toldbodgade	70	Jagtvej(2)
5	Øster Søgade	38	Nordre Fasanvej(1)	71	Bülowsvej(2)
6	Hammerichsgade	39	Bredgade	72	Godthåbsvej(2)
7	Åboulevard(1)	40	Vester Farimagsgade	73	Øster Voldgade(2)
8	Åboulevard(3)	41	Nørre Voldgade(2)	74	Grøndals Parkvej
9	Ågade	42	Jagtvej(3)	75	Rebildvej
10	Nørre Søgade	43	Nordre Fasanvej(3)	76	Blegdamsvej
11	Øster Voldgade(1)	44	Nørre Farimagsgade	77	Ålholmvej(2)
12	Lyngbyvej(2)	45	Frederikssundsvej(8)	78	Amagerbrogade(3)
13	Bernstorffsgade(1)	46	Søndre Fasanvej(2)	79	Frederikssundsvej(5)
14	Bernstorffsgade(2)	47	Torvegade	80	Ingerslevsgade
15	Vesterbrogade(1)	48	Godthåbsvej(3)	81	Vesterfælledvej
16	Enghavevej	49	Jyllingevej(1)	82	Frederiksborgvej(1)
17	Amagerbrogade(2)	50	Hillerødgade(1)	83	Slotsherrensvej(2)
18	Tagensvej(2)	51	Tagensvej(1)	84	Strandvejen(2)
19	Frederikssundsvej(3)	52	Tuborgvej(2)	85	Artillerivej
20	Gothersgade(1)	53	Gammel Køge Landevej(1)	86	Frederikssundsvej(2)
21	H.C. Ørsteds Vej(2)	54	Folehaven(1)	87	Tuborgvej(1)
22	Stormgade	55	Frederikssundsvej(1)	88	Peter Bangs Vej(2)
23	Amagerbrogade(1)	56	Roskildevej(1)	89	Peter Bangs Vej(1)
24	Fredensgade	57	Amager Boulevard	90	Røde Mellemvej(2)
25	Strandvejen(1)	58	Kalvebod Brygge	91	Bellahøjvej
26	Tomsgårdsvej(2)	59	Istedgade	92	Halmetgade
27*	Jagtvej(1)	60	Nørrebrogade	93	Strandvænget(2)
28	Toftegårds Allé(1)	61	Østerbrogade(1)	94	Slotsherrensvej(1)
29	Vesterbrogade(3)	62	Tagensvej(4)	95	Frederiksborgvej(2)
30	Falkoner Alle(2)	63	Folke Bernadottes Allé	96	Gammel Køge Landevej(2)
31	Østerbrogade(4)	64	Røde Mellemvej(1)	97	Vigerslevvej(2)
32	Scandiagade	65	Hulgårdsvej(2)	98	Englandsvej(2)
33	P Knudsens Gade(2)	66	Dag Hammarskjølds Allé		



Figur 2.6. Kortet viser placeringen af de udvalgte gadestrækninger i København og årsmiddelkoncentrationer for kvælstofdioxid i 2020. Det lille tal i prikkerne angiver årsmiddelkoncentrationen i µg/m³. Bidraget fra trafikken i gaderne er modelleret med OSPM®. Bybaggrundsbidraget er modelleret med UBM med input fra den regionale langtransportmodel DEHM. Værdien for en gadestrækning er for den side af gaden, der har den højeste årsmiddelkoncentration af de to sider. Men for gader med en målestation er det den side, hvor stationen er placeret. Navne og numre for gaderne er vist i Tabel 2.3. Kortet kan ses som en web-GIS-tjeneste, se <https://arcg.is/0yi9Gz>

2.4.2 Modelberegninger for Aalborg

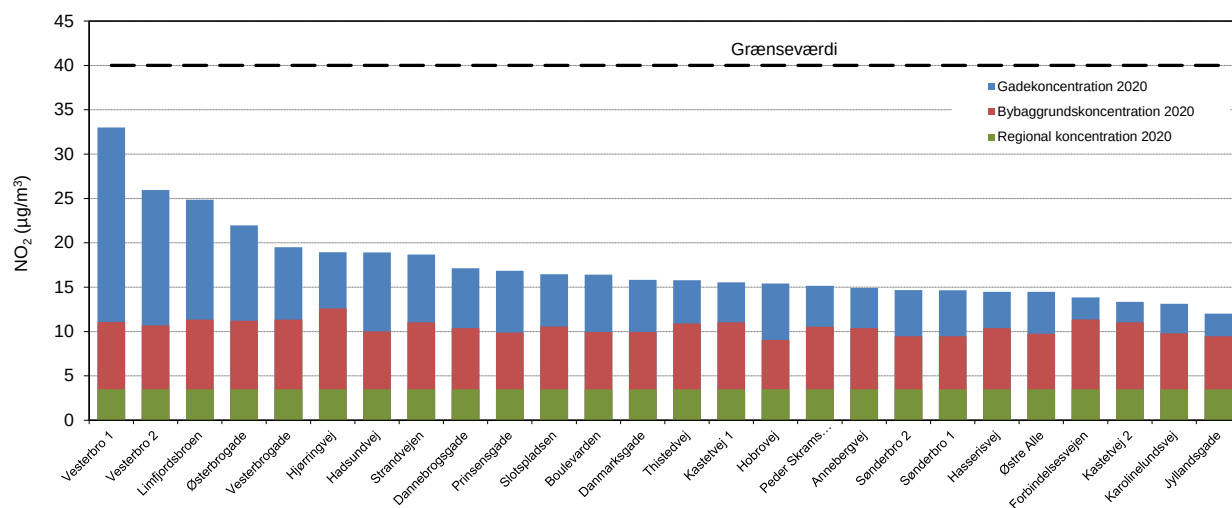
Fra 2018 til 2019 blev der lavet ændringer i udvalget af gadestrækninger, der laves modelberegninger for. Ændringerne er sket for at skabe størst mulig sammenhæng mellem de gader, hvor Aalborg Kommune jævnligt gennemfører trafiktællinger for at sikre det bedst mulige trafikale grundlag for luftkvalitetsberegningerne. 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 2020.

ÅDT var mellem 3.300 og 36.400 køretøjer om dagen i Aalborg. I gennemsnit er ÅDT lidt lavere i 2020 i forhold 2019. Den samlede trafik er faldet med omkring 2%, som dækker over færre personbiler og tunge køretøjer, men lidt flere varebiler. Alt andet lige, vil det give lidt lavere udledninger. Rejsehastigheden er antaget at være uændret.

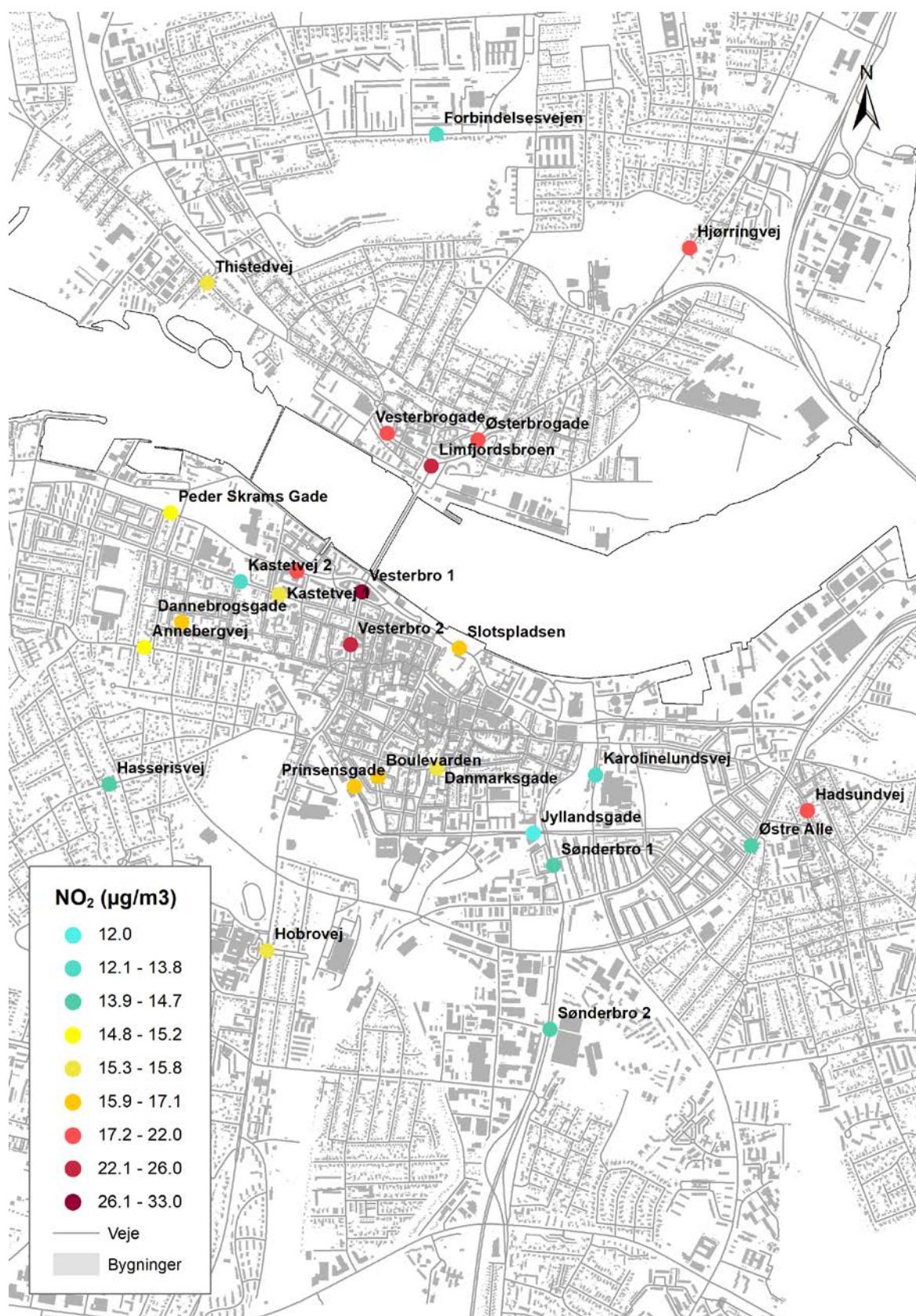
Årsmiddelkoncentrationerne for kvælstofdioxid for de 26 udvalgte gadestrækninger ligger i intervallet fra 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ og op til 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figur 2.7). Gennemsnitligt ligger årsmiddelkoncentrationerne for de 26 udvalgte gadestrækninger i 2020 omkring 2,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ lavere end den gennemsnitlige årsmiddelkoncentration for 2019. Heraf er omkring 1,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pga. faldet i bybaggrundskoncentrationerne.

Målingerne på den nye placering på Vesterbro (Vesterbro 2) startede først i november 2019, så det er ikke muligt at sammenligne årsmiddelværdier mellem 2019 og 2020. Den tidligere placering af målestationen var tættere på Limfjorden (Vesterbro 1). Bemærk at den højeste beregnede NO_2 -koncentration er for gadestrækningen, hvor den tidligere målestationen lå, men på den modsatte side af den tidligere placering af målestationen, da beregningerne viser højere koncentrationer på denne side, og det er den maksimale koncentration af de to sider, som vises. Målingerne på bybaggrundsmålestationen i Aalborg viser et fald fra 2019 til 2020.

Ifølge modelberegningerne blev grænseværdien for årsmiddelkoncentration i 2020 ikke overskredet på nogen af de 26 udvalgte gader (Figur 2.7 og 2.8), og de beregnede koncentrationer er langt under grænseværdien på 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. I forhold til WHO's nye retningslinjer for luftkvalitet på 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for årsmiddelværdien af NO_2 (WHO, 2021a) er der overskridelser på samtlige gader i Aalborg.



Figur 2.7. Årsmiddelkoncentrationer for kvælstofdioxid i 2020 for 26 udvalgte gadestækninger i Aalborg baseret på modelberegninger. Bidraget fra trafikken i gaderne er baseret på gadeluftkvalitetsmodellen OSPM® (blå farve). Bybaggrundsbidraget (røddlig farve) er baseret på beregninger fra baggrundsmodellen UBM med input fra den regionale langtransportmodel DEHM (grøn farve). Værdien for en gadestækning er for den side af gaden, der har den højeste årsmiddelkoncentration af de to sider. Vesterbro 2 er den gadestækning, hvor målestationen ligger. Målestationen blev taget i brug i november 2019. Målestationen er flyttet fra en tidligere placering på Vesterbro, som lå tættere på Limfjorden (Vesterbro 1).



Figur 2.8. Kortet viser placeringen af de udvalgte gadestrækninger i Aalborg og årsmiddelmålkoncentrationer for kvælstofdioxid i 2020. 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 årsmiddelmålkoncentration 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), men blev først taget i brug i november 2019. Kortet kan ses som en webGIS-tjeneste, se <https://arcg.is/qG4WO>

2.4.3 Udvikling i modellerede overskridelser af kvælstofdioxid

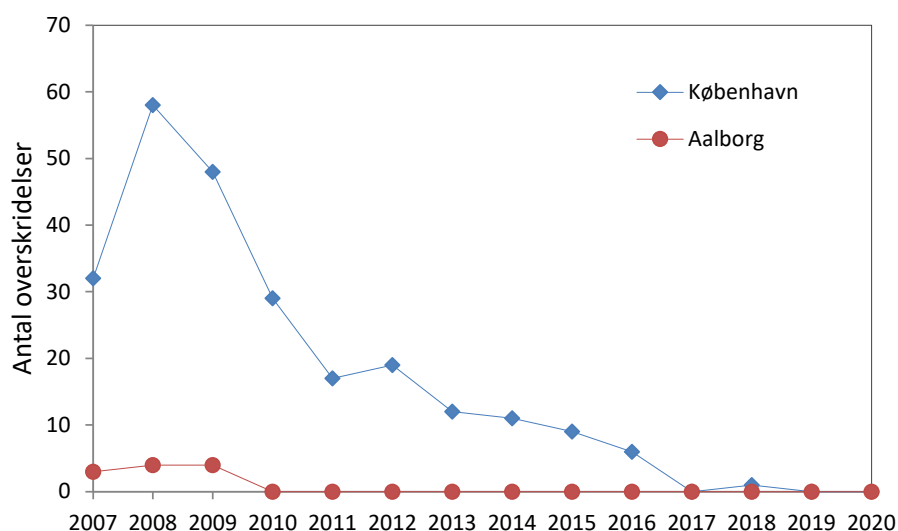
Figur 2.9 viser udviklingen i antallet af overskridelser af årsmiddelkoncentrationen af kvælstofdioxid for de udvalgte gadestrækninger i København og Aalborg.

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 overskridelse faldet fra 58 i 2008 til seks i 2016, og yderligere til nul i 2017, én i 2018, og nul i 2019 og 2020. 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 i 2019 og 2020.



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

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

3. Carbonmonoxid, CO

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

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

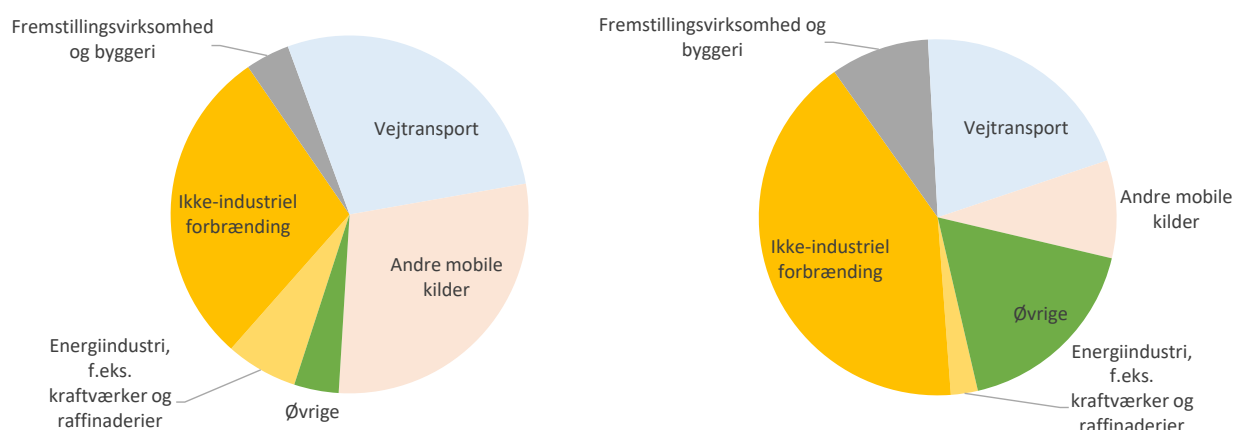
Status og udvikling i luftkoncentrationerne af carbonmonoxid blev i 2020 målt på fire gademålestationer, en bybaggrundsmålestation og en landbaggrundsmålestation.

3.1 Udledninger

I 2019 kom de største bidrag til udledningerne af carbonmonoxid omtrent ligeligt fra ikke-industriel forbrænding, vej- og andre mobile kilder (Figur 3.1 og Tabel 3.1; Nielsen et al., 2021). Til sammen udgør disse tre kilder omkring 90% af de samlede udledninger.

De samlede udledninger af carbonmonoxid er faldet med omkring 70% siden begyndelsen af 1990'erne (Figur 3.2; Nielsen et al., 2021). Det største fald er sket for vejtransport (omkring 90%), som tidligere var langt den mest dominerende kilde (Figur 3.2). Det store fald er opnået ved indførelse af katalysatorer på køretøjerne fra begyndelsen af 1990'erne. Til gengæld er de ikke-industrielle udledninger faldet betydeligt mindre med det resultat, at de ikke-industrielle udledninger i dag udgør samme andel som vejtransport og andre mobile kilder.

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

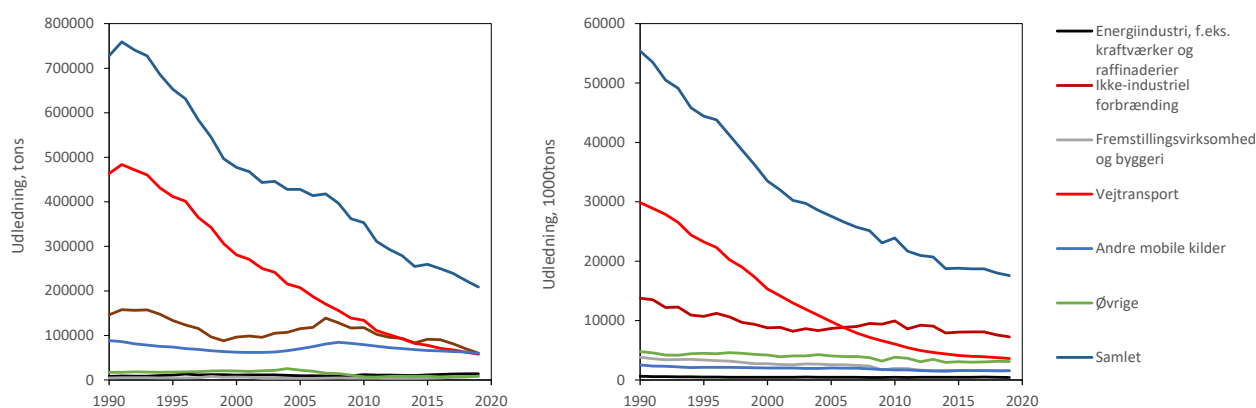


Figur 3.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af carbonmonoxid i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2019. Figureerne viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2021, CEIP, 2021).

Tabel 3.1. Kilderne til de menneskabte udledninger af carbonmonoxid i Danmark i 2019 (Nielsen et al., 2021). 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	2019
		Tons	%
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	13579	7
Ikke-industriel forbrænding	2	60310	29
<i>Handel og service</i>	201	892	0
<i>Husholdninger</i>	202	54958	26
<i>Land, skovbrug og akvakultur</i>	203	4460	2
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	8332	4
Industrielle processer	4	8	0
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	5	0	0
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	3037	1
Vejtransport	7	58091	28
<i>Udstødning</i>	701-706	58091	28
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	0	0
Andre mobile kilder*	8	59967	29
Affald	9	1544	1
Landbrug	3b,d,f-i	3813	2
Samlet		208682	100

* Data inkluderer national søfart, al flyvning under 3000 fod, togtrafik, også 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., 2021; CEIP, 2021).

3.2 Status for luftkvalitet

Carbonmonoxid blev i 2020 målt ved gademålestationerne i København, Odense og Aarhus samt ved bybaggrundsmålestationen i København og landbaggrundsmålestationen ved Risø. Tabel 3.2 angiver årsmiddelværdien og resultaterne for den maksimale 8-timersmiddelværdi. Den højest målte maksimale 8-timersmiddelværdi udgør kun omkring 20% af grænseværdien, og ved alle målestationerne ligger de målte koncentrationer således langt under grænseværdien.

Tabel 3.2. Årsmiddelværdi for carbonmonoxid i 2020 samt den maksimale 8-timersmiddelværdi. Endvidere angives grænseværdien for CO (EU, 2008).

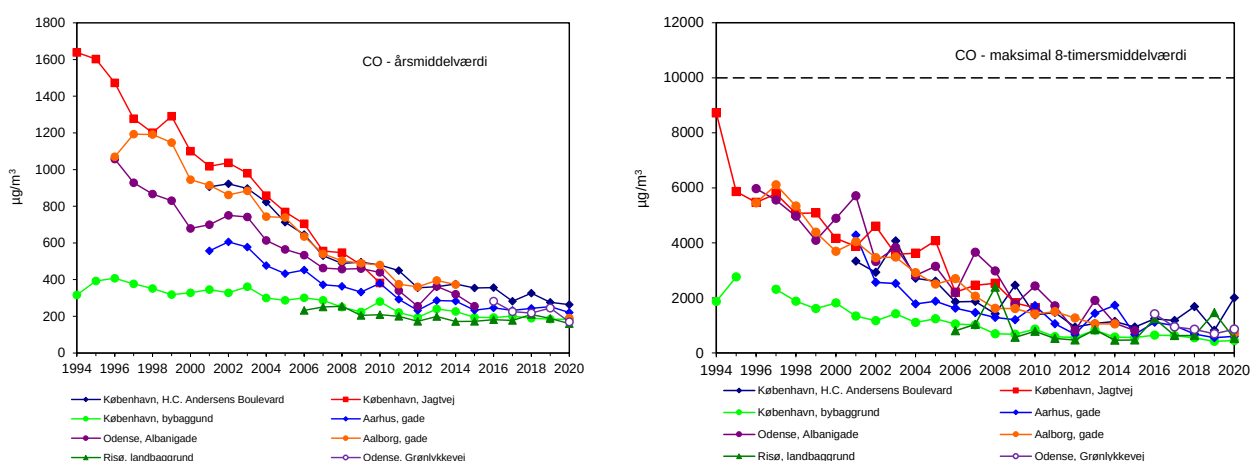
	Årsmiddel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Maksimal 8-timersmiddelværdi $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Grænseværdi		10.000
<i>Gade</i>		
København, H.C. Andersens Boulevard	264	2004
Odense, Grønløkkevej	170	860
Aarhus, Banegaardsgade	221	603
Aalborg, Vesterbro	191	710
<i>Bybaggrund</i>		
København	184	446
<i>Landbaggrund</i>		
Risø	160	526

Koncentrationsniveauet er nogenlunde på samme niveau ved gademålestationerne i København, Odense og Aarhus. Ved gademålestationerne er omkring 75% af carbonmonoxid fra den regionale baggrund i 2020. De resterende omkring 25% stammer fra udledningerne fra trafikken i den pågældende gade (gadebidraget).

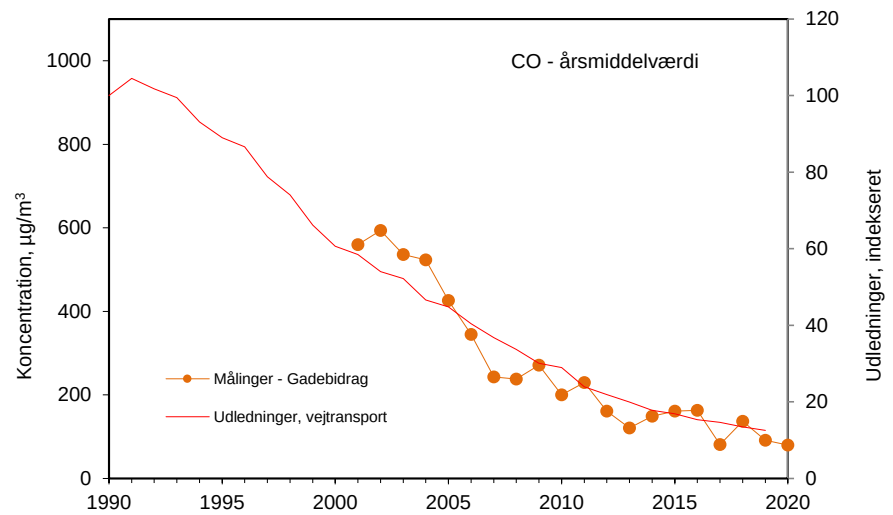
3.3 Udviklingstendens

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 2020 lå de målte koncentrationer ved gademålestationerne på omkring 20% af niveauerne i midten af 1990'erne.

Det store fald på de danske gademålestationer skyldes hovedsageligt det store fald i 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 (venstre) og de maksimale 8-timersmiddelværdier (højre) for carbonmonoxid. Den stiplede linje i den højre figur angiver EU's grænseværdi.



Figur 3.4. Udviklingen i gadebidraget til luftkoncentrationerne af carbonmonoxid (venstre akse) ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard sammenholdt med den relative udvikling i udledningerne af carbonmonoxid (højere akse, indekseret til 100 i 1990) (Nielsen et al., 2021). Gadebidraget beregnes som forskel mellem de målte koncentrationer på gademålestation (H.C. Andersens Boulevard) fratrasket målte koncentrationer i bybaggrund i København (H.C. Ørsted Institutet).

4. Svovldioxid, SO₂

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

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

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

De lave luftkoncentrationer af svovldioxid i Danmark gør det muligt kun at gennemføre en begrænset overvågning af svovldioxid. Svovldioxid blev i 2020 kun målt med gasmonitører med høj tidsopløsning (½-timesmiddelværdier) ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard i København og på gademålestationen i Aalborg.

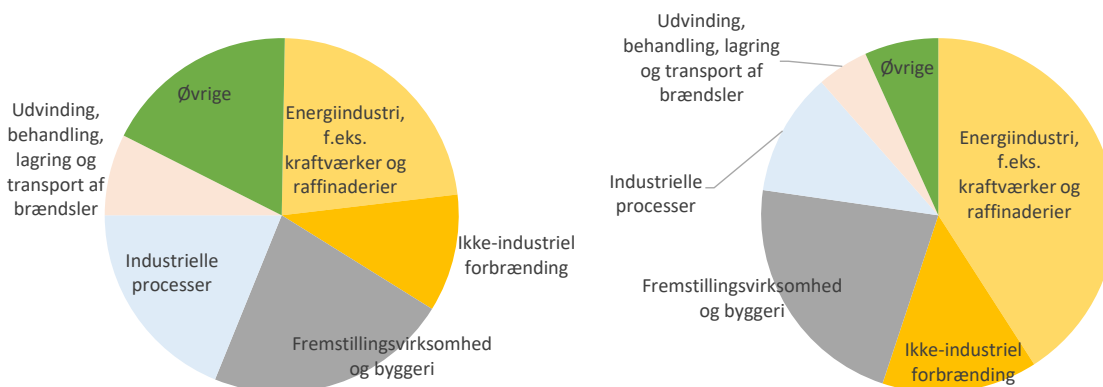
I forbindelse med landbaggrundsmålestationerne foretages også målinger af svovldioxid på døgnmiddelbasis med de såkaldte filterpack-opsamlere (se Elermann et al., 2021 for yderligere detaljer).

4.1 Udledninger

Udledningerne af svovldioxid fra danske kilder har gennem de seneste mange årtier været helt domineret af udledningerne fra afbrænding af navnlig olie og gas. Afsvovlingsanlæg på forbrændingsanlæggene og brug af svovlfattigt brændstof har givet en meget stor reduktion af udledningerne, men selv i 2019 kommer den største del af udledningerne af svovldioxid fra afbrænding af kul, olie og andre brændsler. Udledningerne fra fremstillingsvirksomhed og byggeri er dog på næsten samme niveau (Figur 4.1 og Tabel 2.1; Nielsen et al., 2021). Forbrænding i forbindelse med energiproduktion og affald, fremstillingsvirksomhed og byggeri samt industrielle processer er de tre vigtigste kilde typer, mens vejtransport kun spiller en lille rolle.

De samlede udledninger af svovldioxid er faldet med omkring 95% siden begyndelsen af 1990'erne (Figur 4.2; Nielsen et al., 2021). 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).

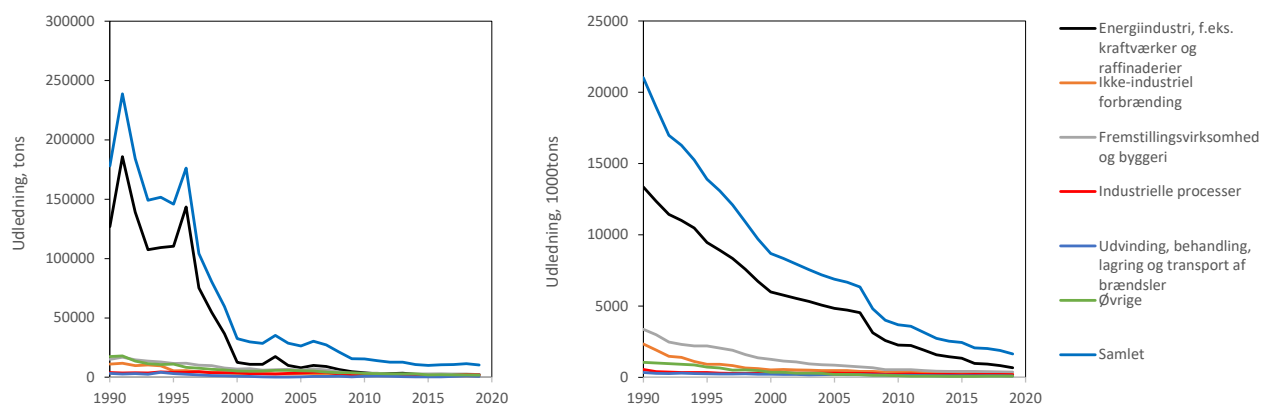


Figur 4.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af svovldioxid i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2019. Figurerne viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2021, CEIP, 2021).

Tabel 4.1. Kilderne til de menneskabte udledninger af svovldioxid i Danmark i 2019 (Nielsen et al., 2021). Kilderne er opgjort i 10 hovedkategorier med en yderligere underopdeling for "Ikke-industriel forbrænding" og "Vejtransport". Opdelingen er baseret på SNAP-koder (Selected Nomenclature for Air Pollution).

Kategori	SNAP-kode	Udledninger	
		Tons	2019 %
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	2386	23
Ikke-industriel forbrænding	2	1122	11
Handel og service	201	48	0
Husholdninger	202	740	7
Land, skovbrug og akvakultur	203	334	3
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	2328	22
Industrielle processer	4	1969	19
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	5	776	7
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	41	0
Vejtransport	7	76	1
Udstødning	701-706	76	1
Ikke-udstødning	707-708	0	0
Andre mobile kilder *	8	629	6
Affald	9	1089	10
Landbrug	3b,d,f-i	29	0
Samlet		10444	100

* Data inkluderer national søfart, al flyvning under 3000 fod, togtrafik, også 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., 2021; CEIP, 2021).

4.2 Status for luftkvalitet

Tabel 4.2 angiver de vigtigste resultater for 2020 i relation til grænseværdier. Der er i EU's luftkvalitetsdirektiv (EU, 2008) fastlagt to grænseværdier af hensyn til begrænsning af befolkningens korttidseksponering for svovldioxid. Begge grænseværdier er overholdt, og både den højeste timemiddel- og døgnmiddelværdi ligger langt under de fastsatte grænser. Ved landbaggrundsmålestationerne ligger koncentrationerne på omkring 10-20% af niveauerne på gademålestationerne på H.C. Andersens Boulevard i København og Vesterbro i Aalborg.

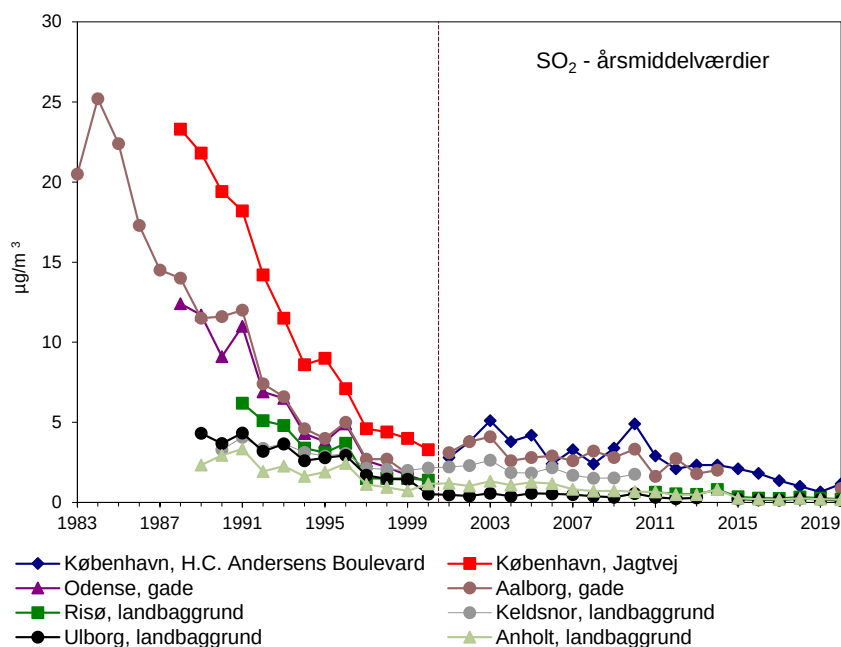
Tabel 4.2. Årsmiddelværdi for svovldioxid i 2020 og en række andre parametre til vurdering af overholdelse af de i EU fastlagte målsætninger for svovldioxid (EU, 2008). For svovldioxid er der to grænseværdier. Den ene er baseret på timemiddelværdien, hvor timemiddelværdien højest må overskride $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 gange i et kalenderår. Den anden er baseret på døgnmiddelværdien, hvor døgnmiddelværdien højest må overskride $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tre gange i et kalenderår. Målingerne ved gademålestationerne er baseret på timemiddelkoncentrationer med automatiske gasmonitører, mens målingerne ved landbaggrundsmålestationerne er baseret på døgnmiddelmålinger ved hjælp af filterpack-opsamlere (og derfor er der ikke data fra landbaggrundsmålestationerne vedrørende timemiddelværdier).

	Årsmiddel- værdi	Højeste time- middelværdi	Antal timer med timemid- delværdi over $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Højeste døgn- middelværdi	Antal dage med døgnmiddel- værdi over $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Antal timer	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Antal dage
Grænseværdi		350	24	125	3
<i>Gade</i>					
København, H.C. Andersens Boulevard	1,2	13	0	2,2	0
Aalborg, Vesterbro	0,9	63	0	2,1	0
<i>Landbaggrund</i>					
Risø	0,2			1,4	0
Anholt	0,2			1,2	0
Tange	0,1			0,9	0
Ulborg	0,1			1,0	0

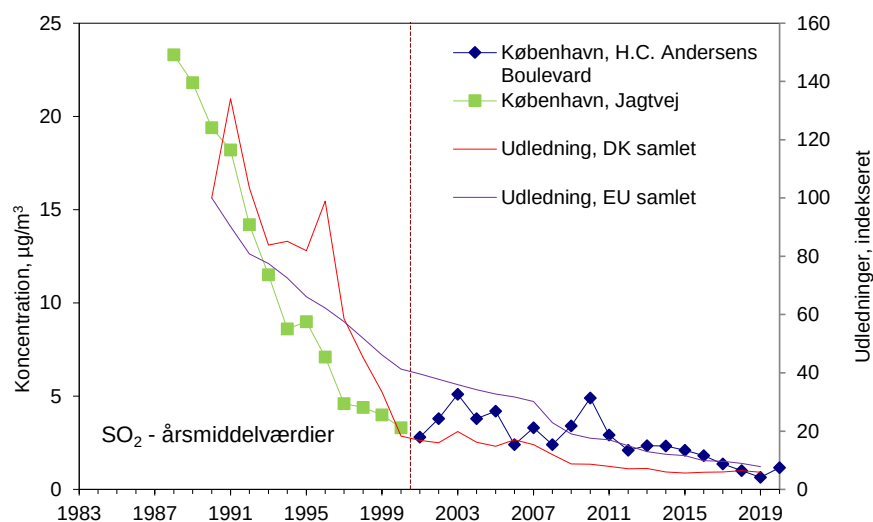
4.3 Udviklingstendens

Figur 4.3 viser udviklingstendensen for årsmiddelværdierne af svovldioxid. Luftkoncentrationerne er faldet markant siden begyndelsen af 1980'erne. I dag udgør de målte luftkoncentrationer på gademålestationer omkring 3% af de målte luftkoncentrationer i 1980'erne. For landbaggrund ses også et markant fald, hvor koncentrationerne i 2020 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 årsmiddeldkoncentrationerne af svovldioxid. Fra 2000 til 2001 (stiplet streg) skifter målemetoden fra filterpack-opsamlere kombineret med kemisk analyse af opsamlede prøver til den nuværende metode baseret på 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 landbaggrundsmålestationer er fortsat baseret på filterpack-opsamlinger.



Figur 4.4. Udviklingen i luftkoncentrationer af svovldioxid på gademålestationer i København (venstre akse) sammenholdt med den relative udvikling i udledningerne af svovldioxid (højere akse, indekseret til 100 i 1990) (Nielsen et al., 2021). Bemærk at udviklingstenden- sen er sammenstykket af målinger fra dels Jagtvej og dels H.C. Andersens Boulevard, hvil- ket 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 koncentration sniveauer (se tek- sten 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 langtidseksponering for benzen. Grænseværdien for benzen angiver, at årsmiddelværdien ikke må overskride $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for et kalenderår.

Benzen overvåges ved tre målestationer i København (gademålestationerne på H.C. Andersens Boulevard og Jagtvej) og ved bybaggrundsmålestationen i København (H.C. Ørsted Institutet). Grundet de lave koncentrationer åbner EU's 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

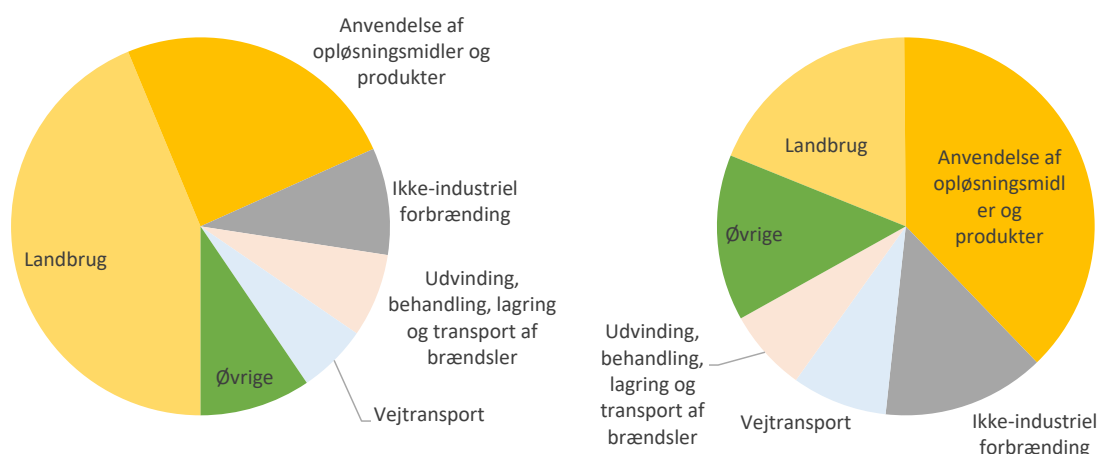
Opgørelser over udledningerne af flygtige organiske forbindelser omfatter som oftest ikke metan, selv om metan også hører under gruppen af flygtige organiske forbindelser, hvilket er fordi metan adskiller sig meget fra den øvrige gruppe af flygtige organiske forbindelser.

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

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

De samlede udledninger af NMVOC er faldet med omkring 52 % siden begyndelsen af 1990'erne (Figur 5.2; Nielsen et al., 2021). Langt størstedelen af faldet i udledninger skyldes reduktionen i vejtransport.

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

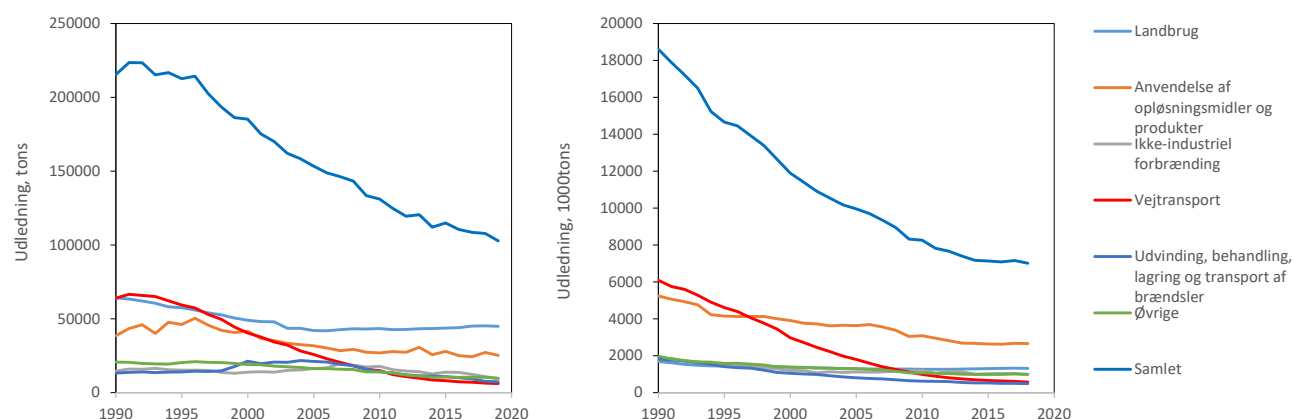


Figur 5.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af flygtige organiske forbindelser i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2019. Figurene viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2021, CEIP, 2021).

Tabel 5.1. Kilderne til de menneskabte udledninger af flygtige organiske forbindelser i Danmark i 2019 (Nielsen et al., 2021). 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 2019	
		Tons	%
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	1134	1
Ikke-industriel forbrænding	2	9411	9
Handel og service	201	152	0
Husholdninger	202	7994	8
Land, skovbrug og akvakultur	203	1265	1
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	1082	1
Industrielle processer	4	2516	2
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	5	7352	7
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	25213	25
Vejtransport	7	6110	6
Udstødning	701-706	6110	6
Ikke-udstødning	707-708	0	0
Andre mobile kilder *	8	4287	4
Affald	9	725	1
Landbrug	3b,d,f-i	44992	44
Samlet		102822	100

* Data inkluderer national søfart, al flyvning under 3000 fod, togtrafik, også 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., 2021; CEIP, 2021).

5.2 Status for luftkvalitet

Tabel 5.2 angiver status for årsmiddelværdierne af benzen, toluen, ethylbenzen og xylenerne i 2020. EU's luftkvalitetsdirektiv angiver kun en grænseværdi for benzen (EU, 2008). Der er ingen overskridelse af grænseværdien og selv de højeste årsmiddelværdier ved gademålestationer ligger på omkring en tiendedel af grænseværdien.

Tabel 5.2. Årsmiddelværdier for benzen, toluen, ethylbenzen og xylenerne i 2020 samt grænseværdi for benzen (EU, 2008).

	Benzen µg/m³	Toluen µg/m³	Ethylbenzen µg/m³	m/p-xylen µg/m³	o-xylen µg/m³
Grænseværdi	5				
<i>Gade</i>					
København, H.C. Andersens Boulevard	0,55	1,31	0,26	0,82	0,28
København, Jagtvej	0,58	1,42	0,27	0,86	0,29
<i>Bybaggrund</i>					
København, H.C. Ørsted Institutet	0,37	0,79	0,11	0,29	0,14

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

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

hvor benzen og carbonmonoxid angives i µg/m³. Ud fra denne sammenhæng og årsmiddelkoncentrationerne af carbonmonoxid estimeres årsmiddelkoncentrationerne af benzen til omkring 0,5-0,6 µg/m³. Niveauet er dermed på niveau med København, idet der skal tages hensyn til, at det objektive estimat er behæftet med stor usikkerhed.

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

Tabel 5.3. Årsmiddelkoncentrationer for udvalgte flygtige organiske forbindelser i 2020 målt ved bybaggrundsmålestationen på H.C. Ørsted Institutet. Til sammenligning angives også årsmiddelkoncentrationerne for 2010 samt faldet i årsmiddelkoncentrationerne fra 2010 til 2020.

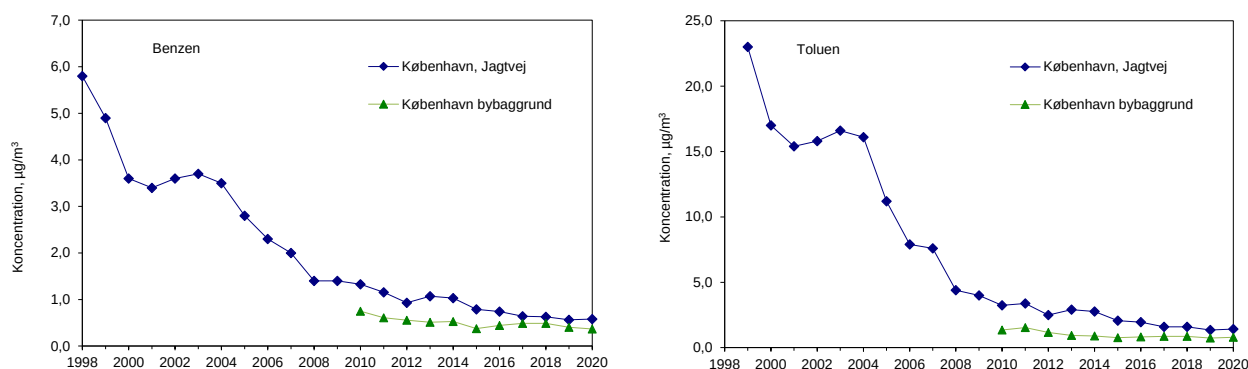
Kemisk forbindelse	Årsmiddelkoncentration, µg/m³		Ændring siden 2010
	2010	2020	%
1-Penten	0,04	0,02	-36
n-Pentan	0,53	0,37	-29
trans-2-Penten	0,02	0,01	-53
Isopren	0,03	0,06	97
2-Methylpentan	0,31	0,27	-14
n-Hexan	0,19	0,25	34
Benzen	0,75	0,37	-51
n-Heptan	0,28	0,12	-57
2,2,4-trimethylpentan/ isooktan	0,10	0,13	28
Toluen	1,36	0,79	-41
n-Oktan	0,08	0,04	-47
Ethylbenzen	0,28	0,11	-61
m- og p-Xylen	0,78	0,29	-62
o-Xylen	0,41	0,14	-66
1,3,5-trimethylbenzen	0,10	Ikke analyseret	-90*
1,2,4-trimethylbenzen	0,34	0,08	-77
1,2,3-trimethylbenzen	0,09	0,02	-76
Samlet	5,68	3,35	-41

*Da 1,3,5-trimethylbenzen ikke er analyseret i 2020, er faldet baseret på årsmiddelkoncentrationen for 2018.

5.3 Udviklingstendens

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

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



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

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 korttidseksponering 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 2020 for ozon har derfor hovedvægt på bybaggrundsmålestationerne (4 stk.) og landbaggrundsmålestationerne (3 stk.), mens der på gadeniveau kun måles på én station, H.C. Andersens Boulevard.

6.1 Status for luftkvalitet

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

Til gengæld så blev EU's langsigtede målsætning overskredet på alle baggrundsmålestationer i 2020 (Tabel 6.1). Denne målsætning er endnu ikke trådt i kraft, og det vides ikke, hvornår det sker.

EU's informationstærskel for timemiddelværdien af ozon på 180 µg/m³ (EU, 2008) blev ikke overskredet i 2020.

Tabel 6.1. Årsmiddelværdier for ozon i 2020 og en række andre parametre til vurdering af overholdelse af de i EU fastlagte målsætninger for ozon (EU, 2008). For ozon er der en gældende målværdi (vurderes som gennemsnit af de seneste tre kalenderår), en langsigtet målsætning, som endnu ikke er trådt i kraft og en informationstærskel, som angiver grænsen for, hvornår befolkningen skal informeres om høje ozonniveauer.

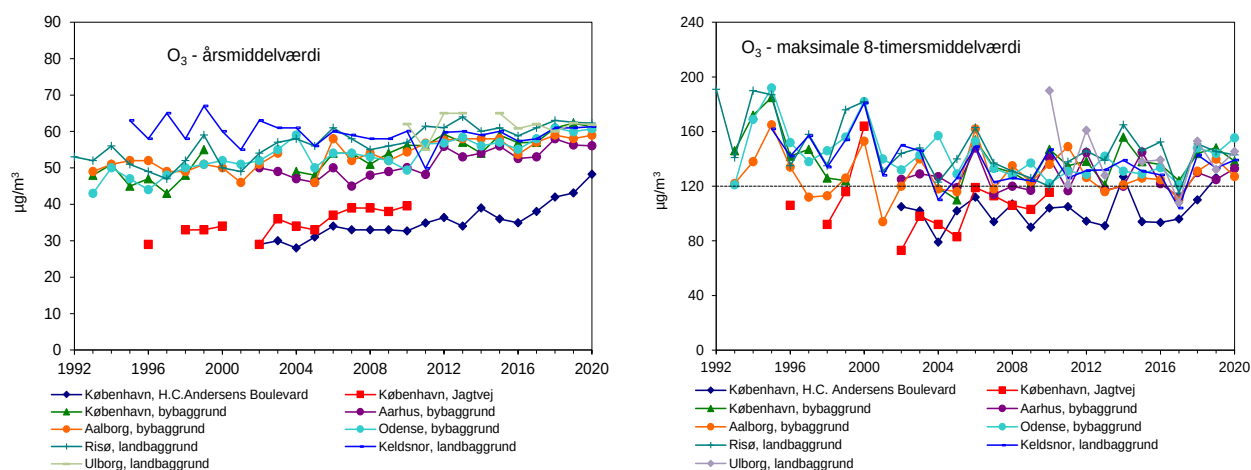
	Årsmiddel µg/m ³	Antal dage med den maksimale 8-timersmiddelværdi over 120 µg/m ³ Antal dage	Maksimum 8-timersmiddelværdi µg/m ³	Højeste timemiddelværdi µg/m ³
Målværdi		25*		
Langsigtet målsætning			120	
Informationstærskel				180
<i>Gade</i>				
København, H.C. Andersens Boulevard	48	0	120	129
<i>Bybaggrund</i>				
København	61	7	138	148
Odense	61	8	155	169
Aarhus	56	2	133	140
Aalborg	59	2	127	132
<i>Landbaggrund</i>				
Keldsnor	61	4	139	148
Risø	62	5	143	151
Ulborg	62	3	145	153

* Målværdi gælder som gennemsnit for de seneste tre kalenderår.

6.2 Udviklingstendens

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

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



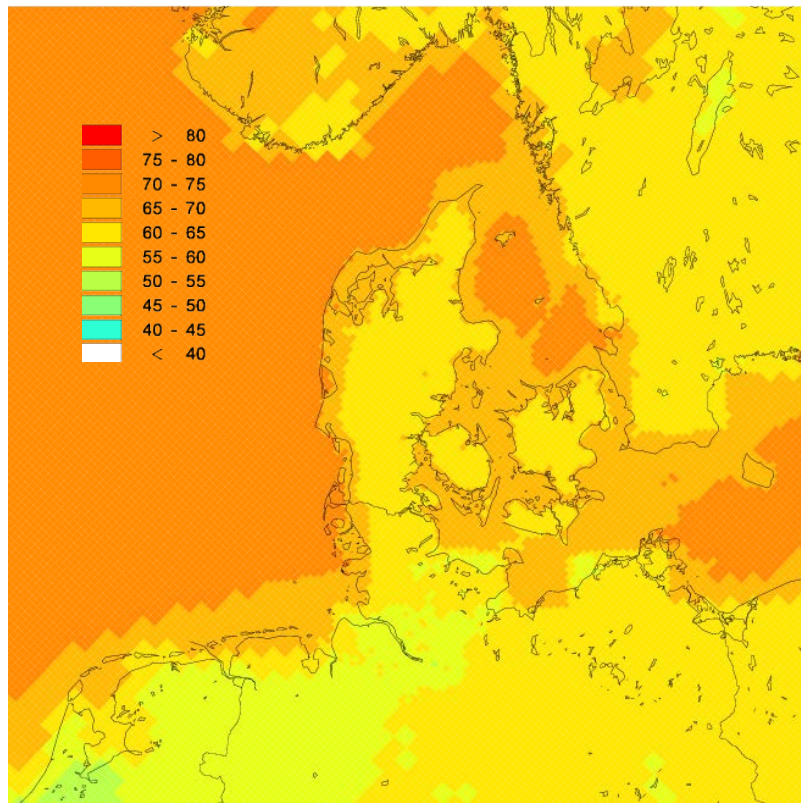
Figur 6.1. Årsmiddelværdier (venstre) og den maksimale 8-timersmiddelværdi (højre) for ozon. Den stiplede linje i den højre figur angiver EU's langsigtede målsætning, som endnu ikke er trådt i kraft (EU, 2008).

6.3 Modelberegninger

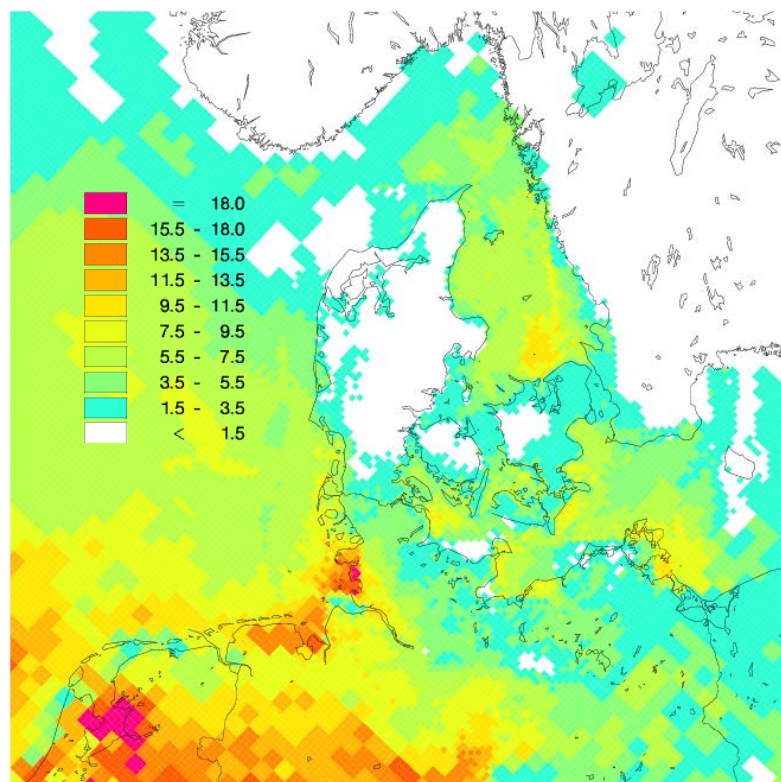
Modelberegninger med regionalskala-modellen DEHM viser, at den geografiske spredning af ozon er lille, og at årsmiddelværdien ligger på omkring 60-65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figur 6.2). Dette er fint i overensstemmelse med resultaterne fra målingerne (Tabel 6.2). Årsmiddelkoncentrationen ligger en 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 fjernelser 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 2020. Der er igen områder, hvor EU's grænse på 25 dage er overskredet.

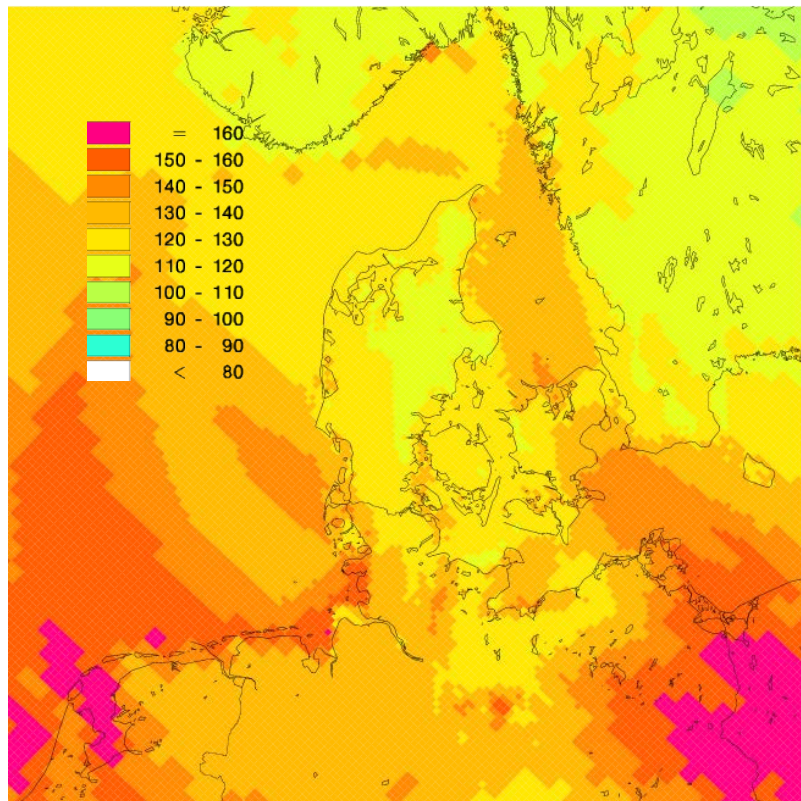
EU's langsigtede målsætning angiver, at den maksimale 8-timersmiddelværdi ikke må overskride 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i løbet af kalenderåret (EU, 2008). Figur 6.4 viser den geografisk variation for den maksimale 8-timersmiddelværdi. Her ses, at EU's langsigtede målsætning er overskredet i den største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



Figur 6.2. Årsmiddelkoncentrationer for ozon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) i 2020 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 2020 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 2020 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. De er så små, at deres masse er ubetydelig. Partikelantal omtales ofte som mængden af ultrafine partikler, hvilket strengt taget ikke er helt korrekt, da de ultrafine partikler kun dækker partikler med diameter op til 100 nm. Partikelantallet i hele 11 – 550 nm-intervallet er dog skønsmæssigt kun omkring 15-25 % højere end antallet af ultrafine partikler i det korrekte størrelsesinterval. Forskellen afhænger af lokalitet (landbaggrund, bybaggrund, gade).
- **PM_{2,5}:** Massen af fine partikler med diameter mindre end 2,5 μm . De ultrafine partikler er altså en delmængde af PM_{2,5}, men massen af de ultrafine partikler er meget lille, så derfor udgør de ultrafine partikler en ubetydelig andel af PM_{2,5}.
- **PM₁₀:** Massen af partikler med diameter mindre end 10 μm . PM_{2,5} er en delmængde af PM₁₀. PM₁₀ kan i visse sammenhænge med fordel opdeles i de fine partikler (PM_{2,5}) og de grove partikler (PM₁₀ fratrukket PM_{2,5}).

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

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

EU's luftkvalitetsdirektiv har endvidere fastlagt et nationalt reduktionsmål for at begrænse de skadelige virkninger af luftforurening på menneskers

sundhed (EU, 2008). Reduktionsmålet er fastlagt på basis af en "indikator for gennemsnitlig eksponering" (på engelsk Average Exposure Indicator, AEI), som beregnes ud fra den gennemsnitlige bybaggrundskoncentration i Danmark af $PM_{2,5}$ taget som gennemsnit for en treårig periode. For Danmark betyder reduktionsmålet, at AEI skal 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 2020 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).

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

7.1 Udledninger

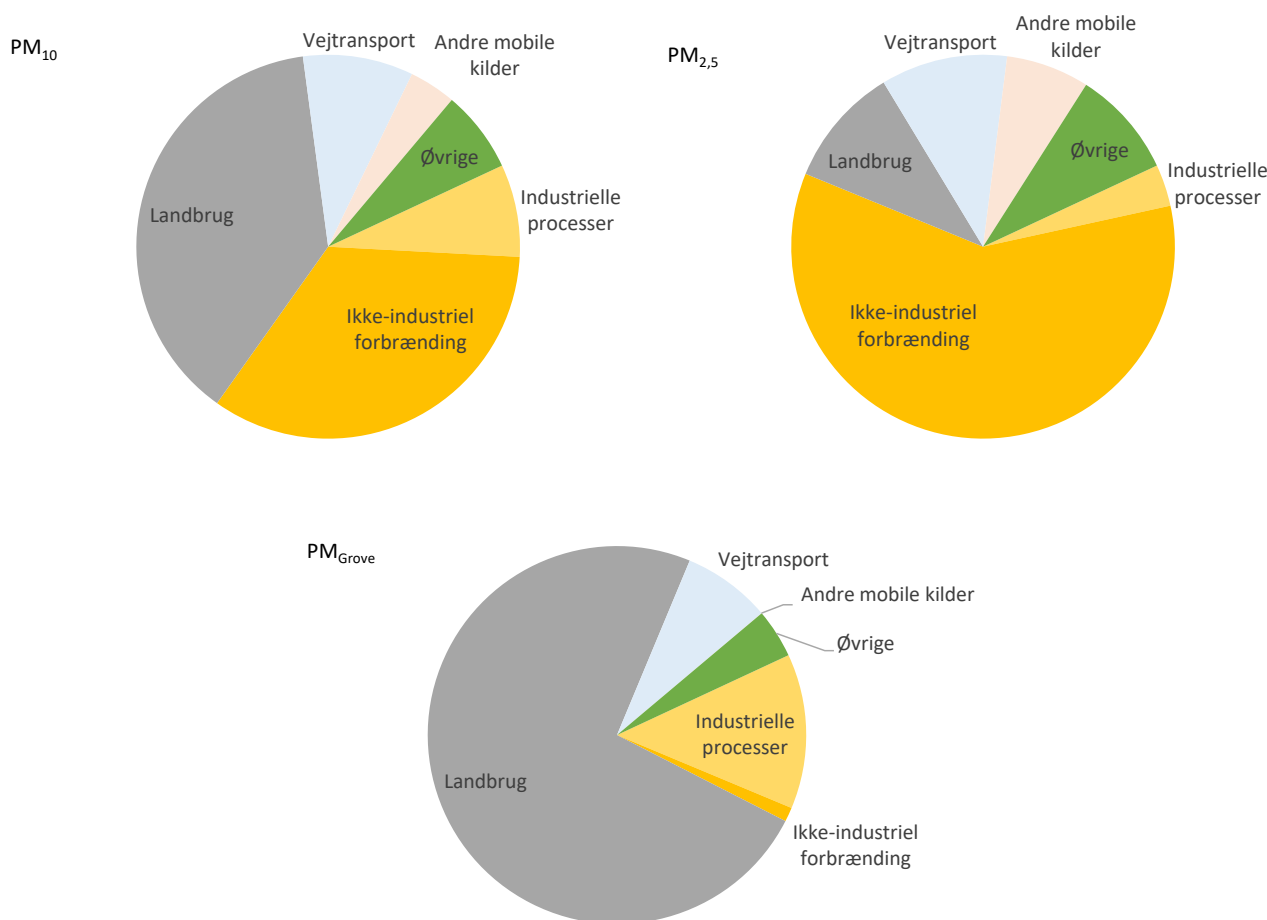
I det følgende præsenteres resultaterne for opgørelse af de direkte udledninger af luftbårne partikler i Danmark. De direkte udledninger udgør kun en lille del af den målte partikelforurening i Danmark, da der, som det indledningsvist blev nævnt, også er naturlige kilder til partikelforureningen, og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

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

De fine partikler ($PM_{2,5}$) udledes i langt overvejende grad fra ikke-industriel forbrænding (hovedsageligt fra anvendelse af brænde til boligopvarmning, Figur 7.1; Nielsen et al., 2021). I 2019 var omkring 60% af udledningerne fra ikke-industriel forbrænding, og 52% fra boligopvarmning. Herefter kommer udledningerne fra vejtransport (11%) og andre mobile kilder (7%).

For de grove partikler (PM_{grove}) ses en meget anderledes kildesammensætning, hvor støv fra landbruget i 2019 stod for hovedparten (omkring 74 %), mens industrielle processer var ansvarlig for omkring 13% 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 PM_{10} 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 47%), mens udledningerne af de grove partikler er faldet væsentligt mindre (omkring 13% fald). Årsagen til den markante top for de grove partikler i 2008 er, at der i 2008 blev anlagt usædvanligt meget ny vej (baseret på informationer fra Danmarks Statistik), hvilket kategoriseres under industrielle processer.



Figur 7.1. Kilderne til de direkte udledninger af partikelforurening i Danmark i 2019 (Nielsen et al., 2021). 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 $PM_{2.5}$. Figurene 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 69%) og andre mobile kilder (omkring 83%), men der er også gennem de seneste år sket et betydeligt fald i udledninger fra ikke-industriel forbrænding (omkring 27%). 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., 2021).

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

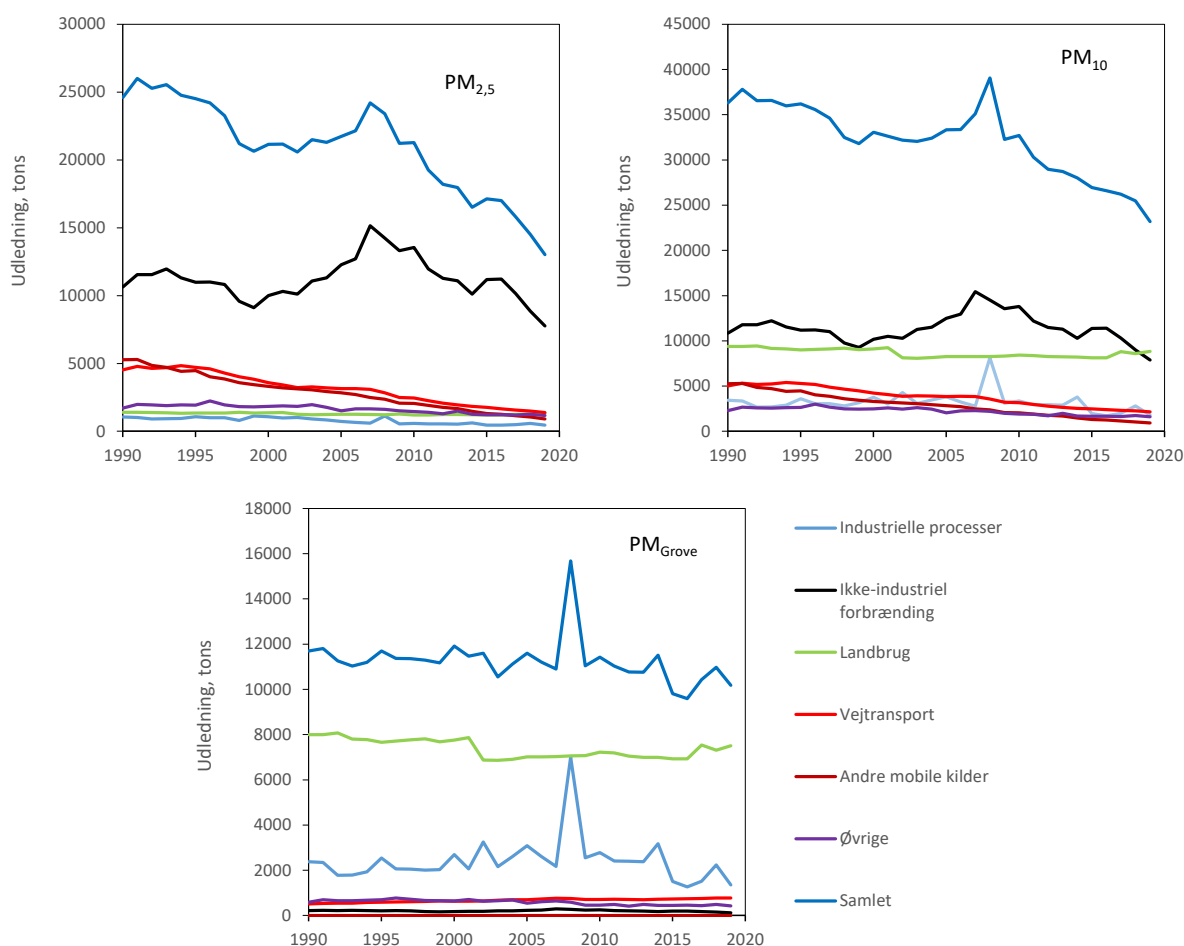
i udledningerne fra vejtransport. De grove partikler fra vejtransport kommer fra dæk-, bremse- og vejslid, som det er vanskeligt at reducere via tekniske tiltag. Den stigende vejtransport har derfor givet øgede udledninger.

For EU-27 ses i store træk et tilsvarende mønster i kildesammensætningen og udviklingstendensen (CEIP, 2021).

Tabel 7.1. Kilderne til de direkte udledninger af partikler i Danmark i 2019 (Nielsen et al., 2021). 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	576	2	454	3	122	1
Ikke-industriel forbrænding	2	7885	34	7761	60	124	1
<i>Handel og service</i>	201	98	0	94	1	5	0
<i>Husholdninger</i>	202	6910	30	6793	52	116	1
<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	203	877	4	874	7	3	0
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	207	1	142	1	65	1
Industrielle processer	4	1808	8	458	4	1350	13
Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	5	31	0	8	0	23	0
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	474	2	256	2	218	2
Vejtransport	7	2160	9	1390	11	770	8
<i>Udstødning</i>	701-706	436	2	436	3	0	0
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	1724	7	954	7	770	8
Andre mobile kilder*	8	916	4	914	7	2	0
Affald	9	315	1	314	2	0	0
Landbrug	3b,d,f-i	8829	38	1319	10	7510	74
Samlet		23200	100	13016	100	10183	100

* Data inkluderer national søfart, al flyvning under 3000 fod, togtrafik, også 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., 2021). 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 årsmiddelværdierne ved gademålestationerne for både $PM_{2,5}$ og PM_{10} i gennemsnit ligger omkring 50% under grænseværdierne. 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 2020 ved nogen af målestationerne.

Måleprogrammet omfatter endvidere målinger af partikelantal, som er en parameter, der angiver den luftbårne forurening med partikler i nanostørrelse. Som allerede beskrevet er disse partikler så små, at deres masse er meget lille, og derfor måles de ved tælling. Måleresultaterne, der præsenteres i denne rapport, dækker partikler i størrelsen af 41 til 478/550 nm og i hele området fra 11 til 478/550 nm. I den seneste årsrapport indgik ikke partikler med diameter mindre end 41 nm grundet tekniske problemer på de nyligt erhvervede instrumenter. Denne fejl blev rettet i begyndelsen af februar 2020, og det har derfor igen været muligt at inkludere partiklerne under 41 nm. Årsagen til angivelsen af to øvre grænser er, at de gamle og nyere 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 8.900 partikler per cm^3 på gademålestationen og ned til omkring 2.700 partikler per cm^3 på landbaggrundsmålestationen (tabel 7.2). For partikler i området fra 41 til 478/550 nm varierer partikelantal fra 2.900 til 1.400 partikler per cm^3 . De helt små partikler mellem 10 og 41 nm udgør dermed størstedelen af partiklerne og ved gademålestationen udgør disse omkring 70% af partiklerne, hvilket skyldes partikeludledningerne fra vejtrafikken. Der er ingen grænseværdier at sammenligne disse værdier med.

Tabel 7.2. Resultater for 2020 og grænseværdier for $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} og partikelantal. For $\text{PM}_{2,5}$ og PM_{10} angives årsmiddelværdien og de tilhørende grænseværdier fra EU's luftkvalitetsdirektiv (EU, 2008). For PM_{10} er der endvidere en grænseværdi for korttidsseksponering for PM_{10} , som angiver at døgnmiddelværdien for PM_{10} ikke må overskride 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mere end 35 gange i et kalenderår (EU, 2008). Til sammenligning med korttidsgrænseværdien angives antallet af dage med overskridelse af 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Endelig angives årsmiddelværdien for antallet af partikler med diameter i intervallerne 11 - 478/550 nm og 41 - 478/550 nm. Der er ingen grænseværdi for partikelantal. Grænseværdier og måleresultater er angivet ved ambient tryk og temperatur.

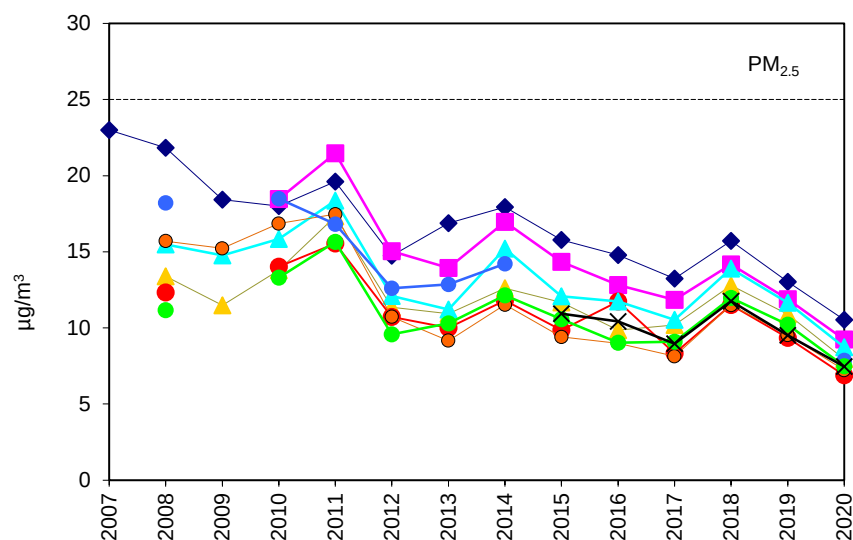
	$\text{PM}_{2,5}$ Årsmiddel	PM_{10} Årsmiddel	$\text{PM}_{2,5}$ Antal dage med døgnmiddelværdi over 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Partikelantal 11-478/550 nm	Partikelantal 41-478/550nm
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Antal dage	Antal/cm^3	Antal/cm^3
<i>Gade</i>					
København, H.C. Andersens Boulevard	11	22	3	8900	2900
København, Jagtvej	9	17	1		
Odense. Grønløkkevej		16	0		
Aarhus, Banegaardsgade	9	16	1		
Aalborg, Vesterbro	8				
<i>Bybaggrund</i>					
København	8	14	1	3200	1700
Aarhus	7				
Aalborg	7				
<i>Forstad</i>					
Hvidovre	7			4400	2100
<i>Landbaggrund</i>					
Keldsnor		14	0		
Risø	7	13	1	2700	1400

PM_{10} ligger halvanden til to gange over $\text{PM}_{2,5}$, hvilket hænger sammen med, at PM_{10} omfatter en større del af de luftbårne partikler end $\text{PM}_{2,5}$. Når man kigger på den samme partikelfraktion (respektiv $\text{PM}_{2,5}$ eller PM_{10}), så ses relativt lille forskel mellem niveauerne på de forskellige typer målestationer, og også indenfor de samme typer af målestationer (tabel 7.2). Til eksempel er der i Københavnsområdet kun 10% og 30% højere værdier for $\text{PM}_{2,5}$ i henholdsvis bybaggrunden og på gadestationerne end målt ved landbaggrundsmålestationen. Endvidere ligger $\text{PM}_{2,5}$ på de tre gademålestationer indenfor $\pm 5\%$ af middelværdien. Årsagen til dette er, at langt hovedparten af $\text{PM}_{2,5}$ og PM_{10} er fra luftbåren langtransport, og at der i forbindelse med langtransporten sker en udjævning af de geografiske forskelle.

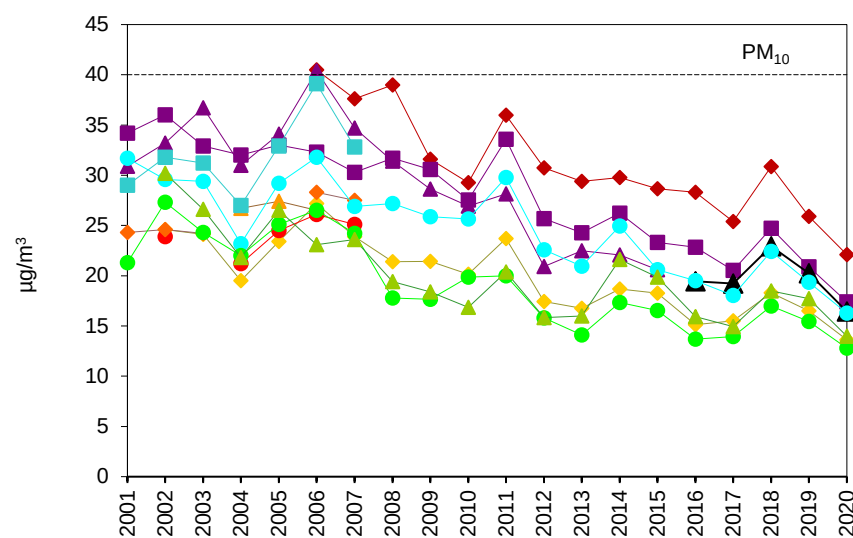
7.3 Udviklingstendens

Målingerne af PM_{10} begyndte i 2001, mens målinger af $PM_{2,5}$ først blev påbegyndt i 2007/2008 i forbindelse med revision af EU's luftkvalitetsdirektiv (EU, 2008). Figur 7.3 viser udviklingstendensen for årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$ og PM_{10} . Der ses et ensartet forløb ved alle målestationerne. $PM_{2,5}$ er faldet med 30-50% og PM_{10} med 30-45% siden opstart af målingerne i henholdsvis 2007/2008 og 2001.

For både $PM_{2,5}$ og PM_{10} ses et markant fald fra 2019 til 2020. Faldet er omtrent lige stort ved alle målestationerne, hvilket peger på, at faldet for en stor del skyldes fald i bidraget fra langtransport af partikelforurening til Danmark. De vigtigste årsager til dette fald i koncentrationerne, er en kombination af et generelt fald i udledningerne, og et yderligere fald pga COVID-19-restriktionerne. Endvidere har de naturlige variationer i de meteorologiske forhold også stor indflydelse på faldets størrelse.



◆ 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

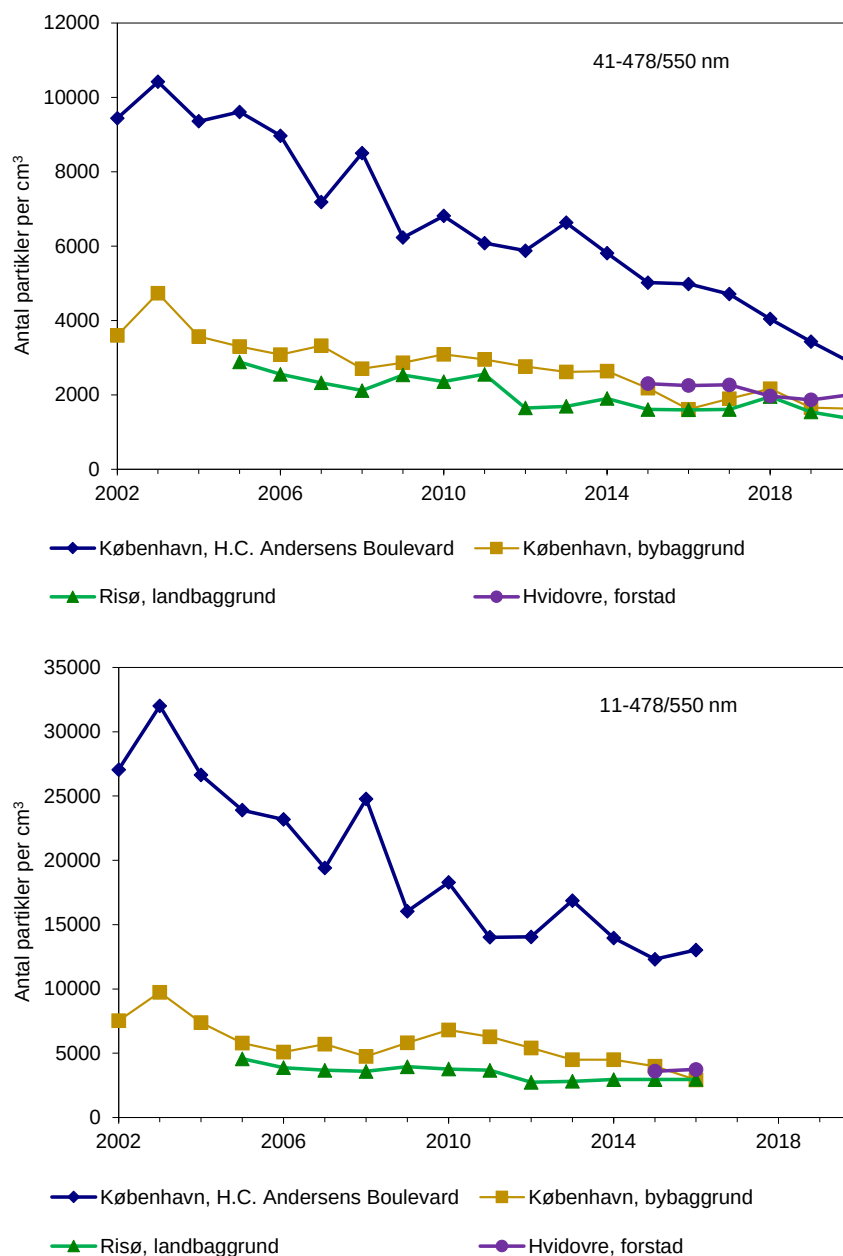
Figur 7.3. Udviklingstendens for årsmiddelværdi af PM_{2.5} (øverst) og PM₁₀ (nederst). De stiplede linjer angiver grænseværdierne for årsmiddelværdien af PM_{2.5} og PM₁₀ (EU, 2008). Fra og med 2012 er PM-værdierne vist ved ambient temperatur og tryk. Til og med 2011 er PM-værdierne vist ved standard betingelser. Ændringen er ca. 2-4% og er ubetydelig i den grafiske præsentation.

Figur 7.4 viser udviklingstendensen for partikelantallet for partikler med diameter på 41 - 478/550 nm (øverst) og udviklingstendensen for partikelantallet for partikler med diameter på 11 - 478/550 nm (nederst), hvor der mangler data for 2017 til 2019 grundet 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 begge fraktioner faldet med omkring 70% og 45% ved henholdsvis gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard og bybaggrundsmålestationen i København. Målinger i landbaggrund ved Risø er først begyndt i 2005, men siden da er partikelantallet faldet med omkring 40% for fraktionen fra 11 - 478/550 nm og omkring 50% for partikelfraktionen fra 41 - 478/550 nm.

Tidsserien for målingerne i forstad (Hvidovre) er relativt kort (begyndt 2015), men siden opstart er partikelantallet faldet med omkring 10% for partikelfraktionen fra 41 til 478/550 nm. Tidsserien er relativt kort og derfor er udviklingstendensen forbundet med stor usikkerhed.

COVID-19-restriktionerne er formentligt en del af årsagen til ændringerne i partikelantallet fra 2019 til 2020, men det er endnu ikke vurderet, hvor stor indflydelse restriktionerne har haft.



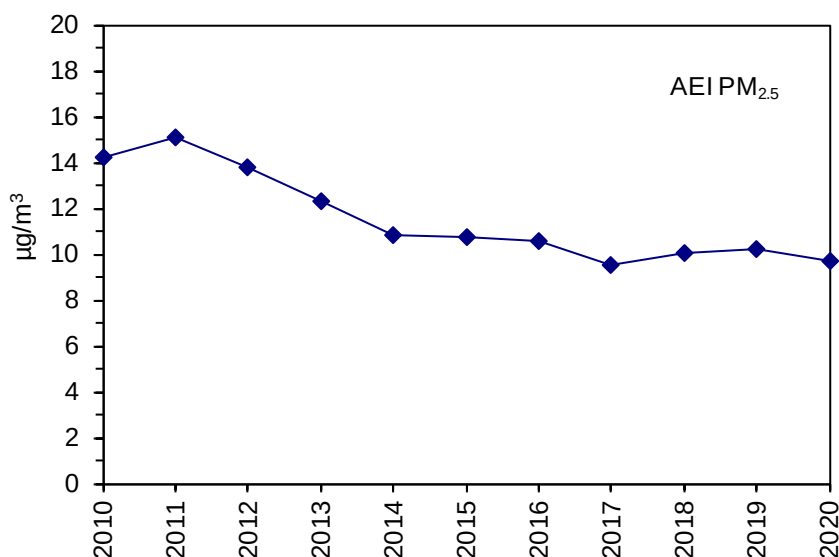
Figur 7.4. Antallet af partikler med diameter mellem 41 nm og 478/550 nm (øverst) og antallet af partikler med diameter mellem 11 nm og 478/550 nm (nederst). Manglende data i perioden fra 2017-2019 skyldes instrumenttekniske problemer med at måle partikelantal i området 11-41 nm i disse år.

Reduktionsmålet er fastlagt på basis af en "indikator for gennemsnitlig eksponering" (på engelsk Average Exposure Indicator, AEI). I overensstemmelse med direktivet beregnes AEI for Danmark ud fra et gennemsnit af årsmiddelværdierne for $PM_{2.5}$ i bybaggrund i København, Aarhus og Aalborg, som et gennemsnit over en treårig periode.

Det nationale reduktionsmål afhænger af AEI i 2010, som i Danmark lå på $14 \mu g/m^3$ (figur 7.5). AEI for 2010 er beregnet på basis af årsgennemsnit for 2008-2010. I henhold til EU's luftkvalitetsdirektiv er det nationale reduktionsmål for Danmark en reduktion i AEI på 15%, som skal være opnået i 2020 (EU, 2008). For 2020 (gennemsnit for 2018-2020) lå AEI på $10 \mu g/m^3$, hvilket ligger

på niveau med de seneste par år. Siden 2010 er der sket et fald i AEI på omkring 30% (figur 7.5), og Danmark opfylder dermed EU's nationale reduktionsmål.

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.



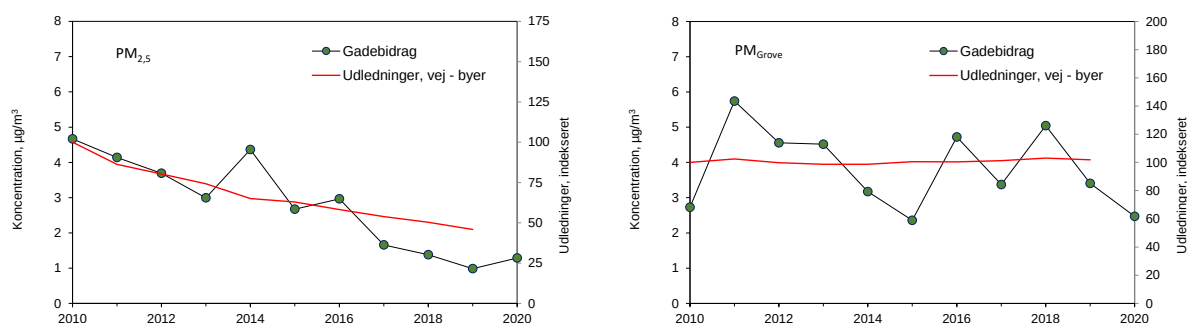
Figur.7.5. Udviklingstendens for Average Exposure Index (AEI) for Danmark siden 2010. AEI beregnes som middel af tre år, så indeks for 2010 er gennemsnit fra 2008-2010 og så fremdeles.

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 kommer udelukkende fra slid på bremses, dæk og vej, og disse udledninger har været svagt stigende grundet stigningen i trafikintensiteten (Figur 7.6).



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., 2021). Gadebidraget er beregnet som forskellen mellem målte luftkoncentrationer ved Jagtvej og i bybaggrund i København (H.C. Ørsted Institutet). Udledningerne er indekseret til 100 i 2010.

7.4 Modelberegninger

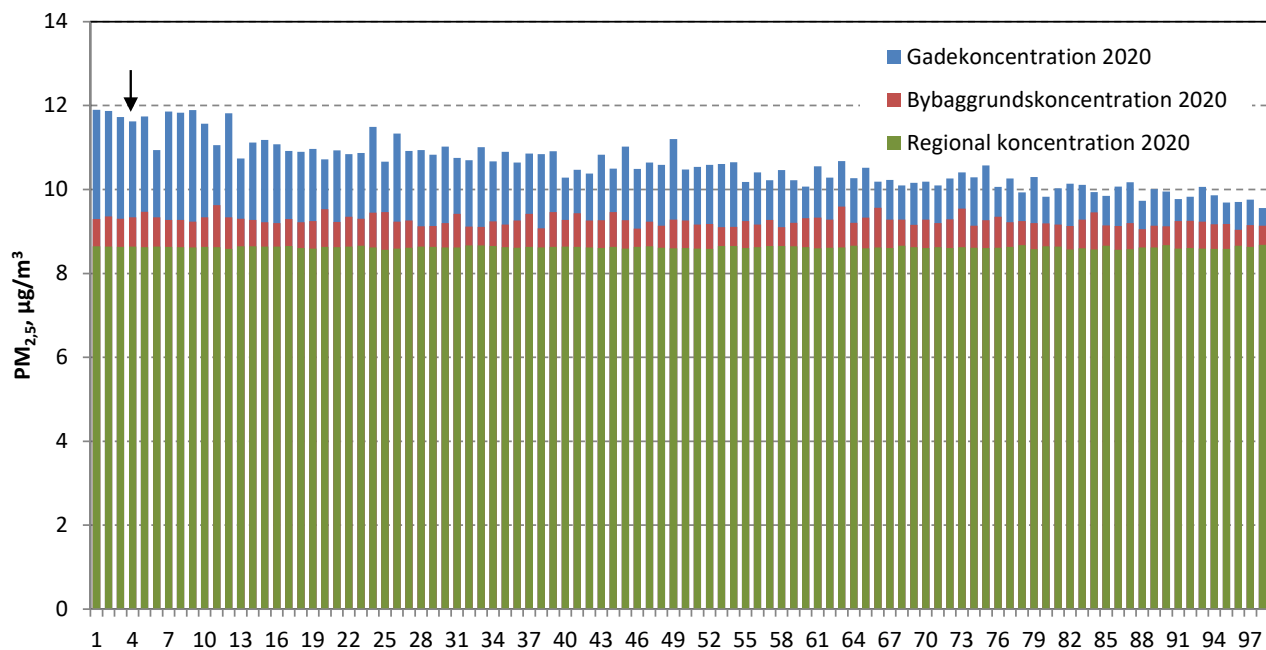
Modelberegninger af årsmiddelkoncentrationer af PM_{2.5} og PM₁₀ for udvalgte gader i København og Aalborg blev første gang rapporteret inden for Det Nationale Luftkvalitetsovervågningsprogram i 2017. De udvalgte gader repræsenterer trafikerede gader og er hovedsageligt lukkede gaderum. Koncentrationerne er forhøjede i denne type gader på grund af de høje emissioner og begrænsede spredningsforhold. 98 gader er inkluderet for København og 26 for Aalborg. ÅDT (årsdøgntrafik, dvs. gennemsnitlig døgntrafik over et år) er mellem 5.000 og 81.000 køretøjer om dagen i København og mellem 3.300 og 36.400 køretøjer om dagen i Aalborg.

Der er foretaget modelberegninger af årsmiddelkoncentrationen af PM_{2.5} og PM₁₀ med henblik på at sammenligne med grænseværdier. Grænseværdien for luftkvaliteten som årsmiddel er henholdsvis 25 og 40 µg/m³ for PM_{2.5} og PM₁₀ (EU, 2008). Endvidere sammenlignes med WHO's retningslinjer for luftkvalitet, som er hhv. 5 og 15 µg/m³ for PM_{2.5} og PM₁₀ (WHO, 2021a).

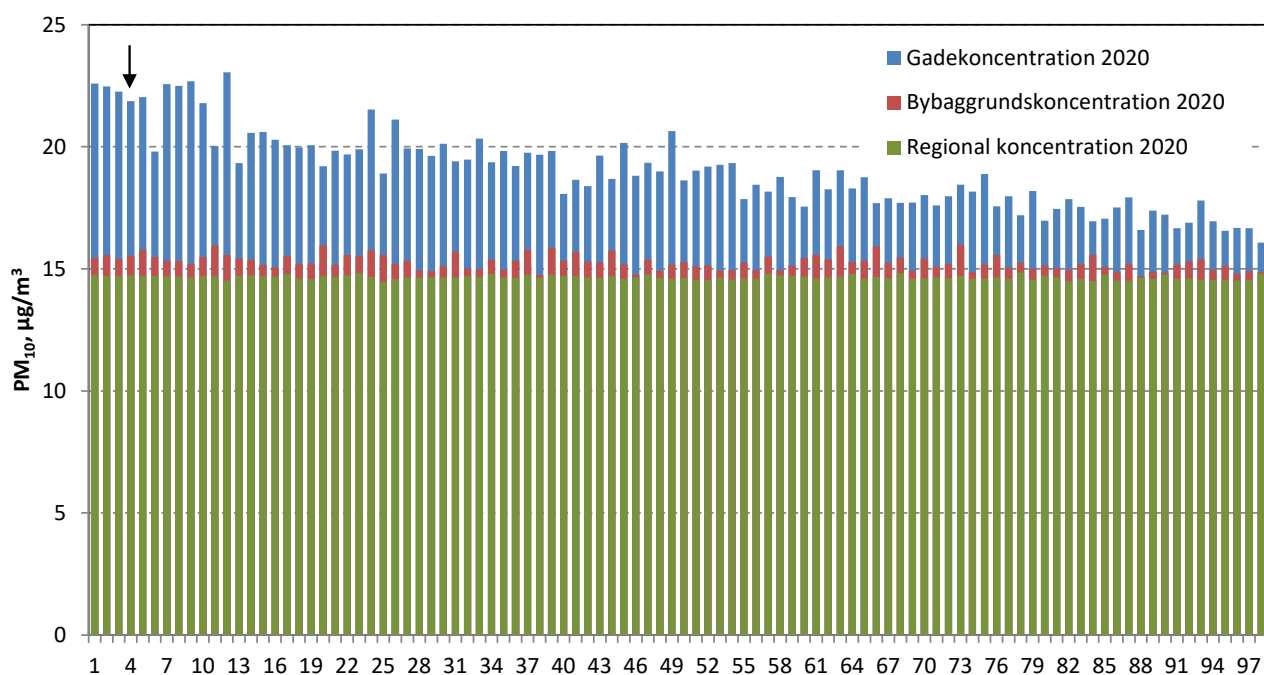
København

Figur 7.7 og 7.8 viser de modellerede årsmiddelkoncentrationer for PM_{2.5} og PM₁₀ for de udvalgte gadestækninger i København. Rangordenen fra kvælstofdioxid er bevaret, og gadenumrene vises i Tabel 7.6.

Årsmiddelkoncentrationerne ligger på 10-12 µg/m³ i 2020 (11-14 µg/m³ i 2019) og 16-23 µg/m³ i 2020 (17-25 µg/m³ i 2019) for henholdsvis PM_{2.5} og PM₁₀. I gennemsnit er årsmiddelkoncentrationer af PM_{2.5} og PM₁₀ faldet hhv. 2,4 µg/m³ og 1,0 µg/m³ fra 2019 til 2020. Årsmiddelkoncentrationerne 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 gadestækninger i København.



Figur 7.7. Modellerede årsmiddelkoncentrationer for $PM_{2.5}$ for de 98 udvalgte gadestrækninger i København i 2020. 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 2020. Gaderne er rangordnet efter koncentrationerne af kvælstofdioxid (Kapitel 2.4). Pilen angiver gadestrækning (HCAB) med en målestation.

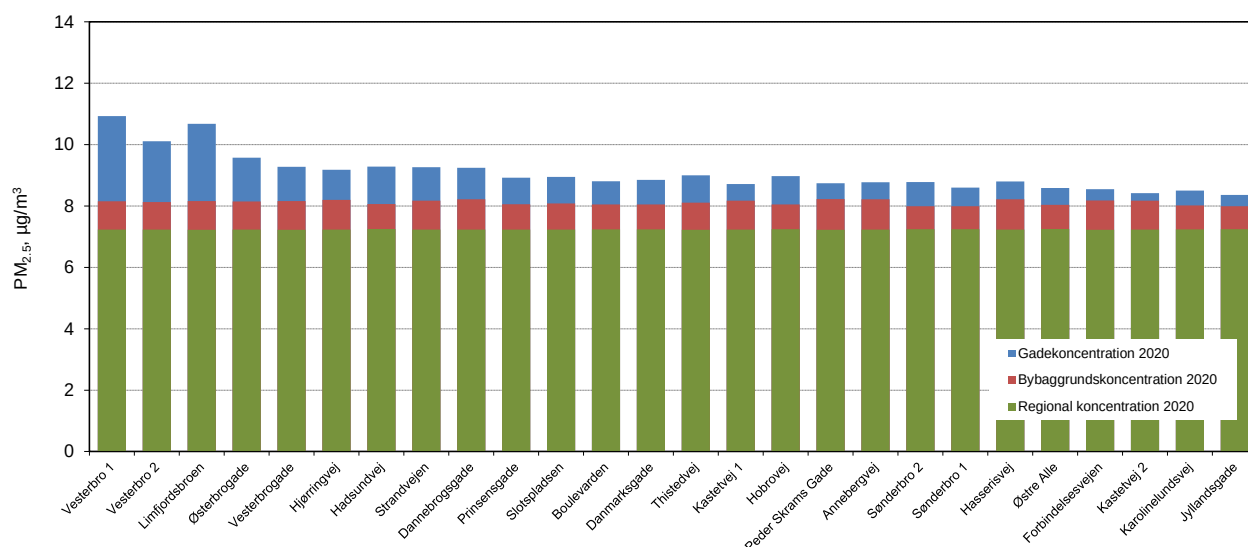
Tabel 7.6. Rangnummer og navne for gadestrækninger, der er vist i Figur 7.7 og 7.8. Gaderne er nummererede (1-98) i forhold til kvælstofdioxidniveauer i 2020 (1 = højeste, 98 = laveste). Tallene i parentes refererer til forskellige delstrækninger af den samme gade, der har mere end én modelberegning. En stjerne (*) angiver en gadestrækningen med en målestation.

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

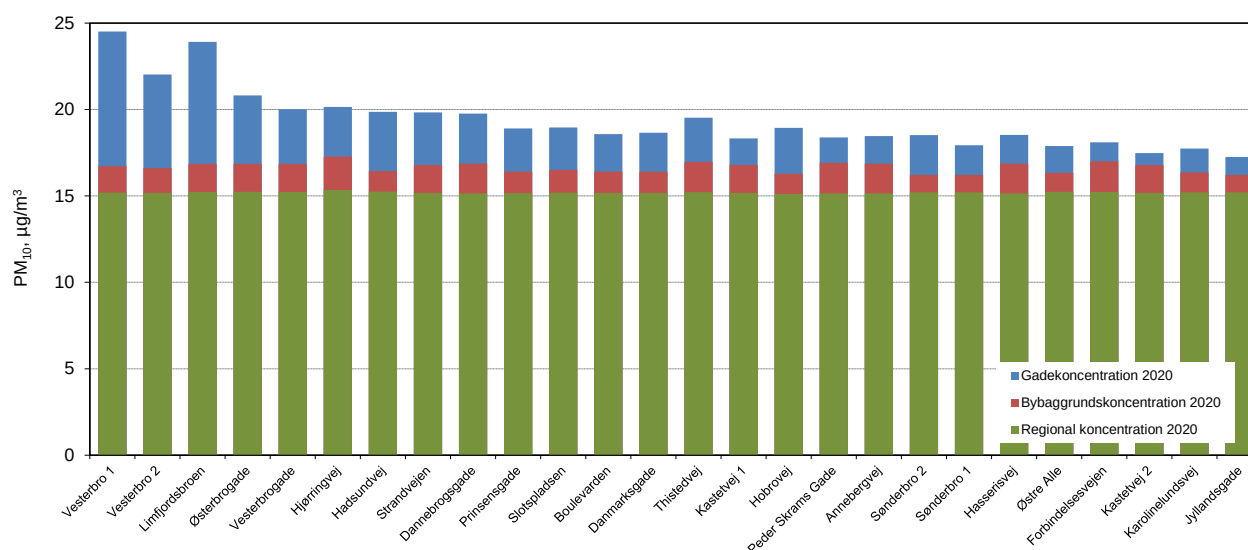
Aalborg

De modelberegnete årsmiddelkoncentrationer for de udvalgte gadestrækninger i Aalborg ligger i intervallerne 9-11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2020 (9-12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2019) og 19-25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2020 (17-25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ i 2019) for henholdsvis $\text{PM}_{2,5}$ og PM_{10} (Figur 7.9 og 7.10). I gennemsnit er årsmiddelkoncentrationer af $\text{PM}_{2,5}$ og PM_{10} faldet henholdsvis 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ og 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ fra 2019 til 2020. Årsmiddelkoncentrationerne ligger dermed et godt stykke under grænseværdien for $\text{PM}_{2,5}$ på 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ og under grænseværdien for PM_{10} på 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Derimod er WHO's

nye retningslinjer for luftkvalitet på $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for $\text{PM}_{2.5}$ og $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM_{10} overskredet på samtlige gadestrækninger i Aalborg.



Figur 7.9. Modelberegnete årsmiddelkoncentrationer for $\text{PM}_{2.5}$ for 26 udvalgte gadestrækninger i Aalborg i 2020. Gaderne er rangordnet efter koncentrationerne af kvælstofdioxid (Kapitel 2.4).



Figur 7.10. Modelberegnete årsmiddelkoncentrationer for PM_{10} for 26 udvalgte gadestrækninger i Aalborg i 2020. Gaderne er rangordnet efter koncentrationerne af kvælstofdioxid (Kapitel 2.4).

8. Elementært – og organisk kulstof

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

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

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

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

Der laves endnu ingen nationale opgørelser over udledningerne af organisk kulstof. EU's luftkvalitetsdirektiv indeholder krav om overvågning af luftbåren elementært - og organisk kulstof i den fine partikelfraktion ($\text{PM}_{2.5}$) på en enkelt målestation i hver 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).

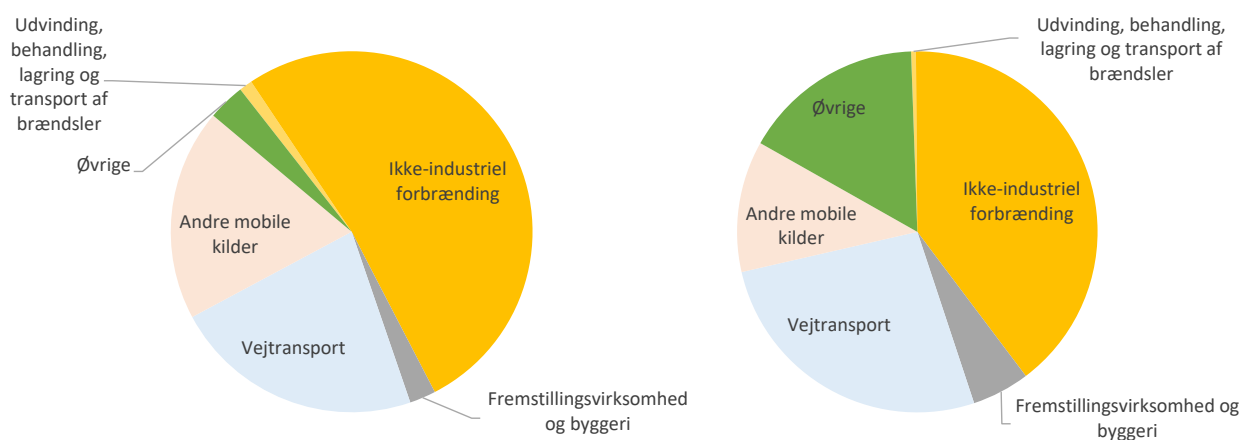
8.1 Udledninger

Den vigtigste kilde til udledningerne af black carbon i 2019 er helt klart ikke-industriel forbrænding, som står for omkring halvdelen af udledningerne (Figur 8.1 og Tabel 8.1), hvoraf hovedparten er fra boligopvarmning med træfyring. Vejtransport og andre mobile kilder med henholdsvis 22% og 19% af udledningerne er anden- og tredjestørste kilder til black carbon.

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

Udover faldet inden for mobile kilder er der også sket et betydeligt fald i udledningerne fra udvinding, behandling, lagring og transport af olie og gas (fald på 77%), hvilket hænger sammen med et lavere forbrug af kul. Samlet set er der sket et fald i udledningerne af black carbon på omkring 70% siden 1990 (Figur 8.2).

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

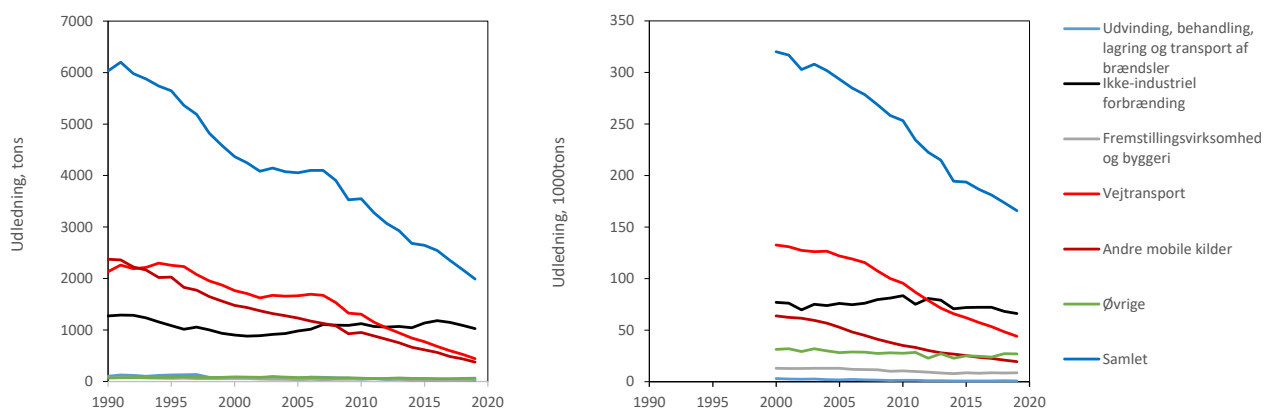


Figur 8.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af black carbon i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2019. Figurene viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2021, CEIP, 2021).

Tabel 8.1. Kilderne til menneskabte udledninger af black carbon i Danmark i 2019 (Nielsen et al., 2021). 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 2019	
		Tons	%
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	28	1
Ikke-industriel forbrænding	2	1030	52
<i>Handel og service</i>	201	19	1
<i>Husholdninger</i>	202	768	39
<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	203	244	12
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	47	2
Industrielle processer	4	3	0
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	5	24	1
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	6	0
Vejtransport	7	446	22
<i>Udstødning</i>	701-706	279	14
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	167	8
Andre mobile kilder*	8	377	19
Affald	9	1	0
Landbrug	3b,d,f-i	29	1
Samlet		1990	100

* Data inkluderer national søfart, al flyvning under 3000 fod, togtrafik, også 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., 2021; CEIP, 2021). Der foreligger kun opdaterede data for EU-27 fra 2000 og frem.

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 landbaggrundsstationerne. De mindste koncentrationer ses ved landbaggrundsmålestationen ved Risø. Der er relativt stor forskel mellem niveauerne, hvor koncentrationen på gademålestationen ligger på omkring en faktor tre højere end i 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.

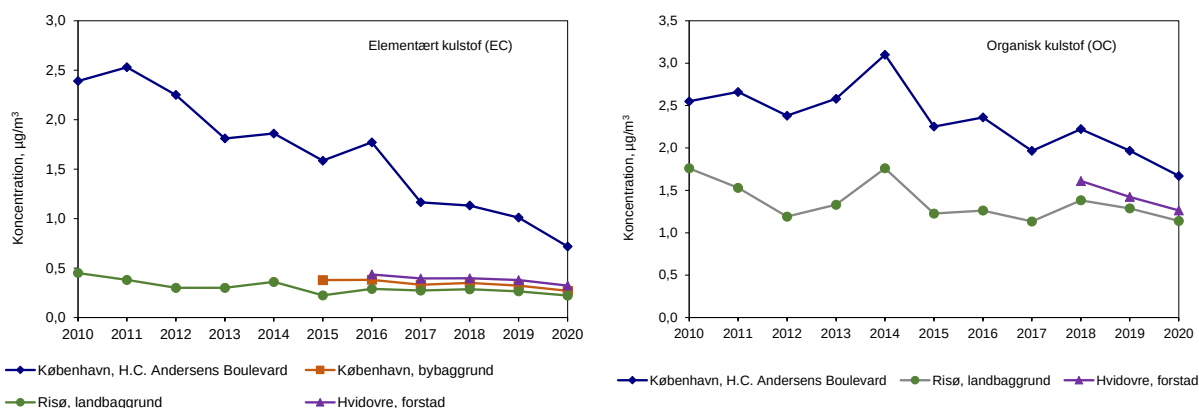
Tabel 8.2. Årsmiddelværdier for elementært- og organisk kulstof i 2020.

	Elementært kulstof µg/m ³	Organisk kulstof µg/m ³
<i>Gade</i>		
København, H.C. Andersens Boulevard	0,72	1,67
<i>Bybaggrund</i>		
København	0,27	
<i>Forstad</i>		
Hvidovre	0,32	1,26
<i>Landbaggrund</i>		
Risø	0,22	1,14

8.3 Udviklingstendens

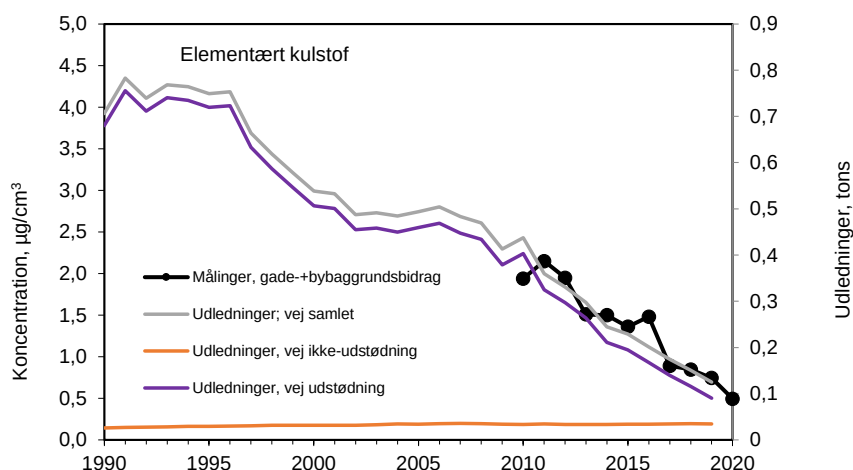
Figur 8.3 viser udviklingstendensen for EC siden begyndelsen af målingerne i 2010. Der ses et fald på omkring 70% siden 2010 ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard. Tilsvarende ses et fald på landbaggrundsmålestationen ved Risø, selv om dette fald er mindre markant (omkring 42%). Ved bybaggrundsmålestationen 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 (25-35% 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.



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

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., 2021). 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 bremser, dæk og vej).

9. Tungmetaller

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

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

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

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

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

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

9.1 Udledninger

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

I 2019 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 2019 fordelt på hovedkategorier (Nielsen et al., 2021). Bemærk at opdelingen er foretaget lidt anderledes og at ikke-industriell forbrænding er placeret under stationær forbrænding.

	Arsen	Bly	Cadmium	Nikkel	Krom	Kobber	Zink
	Tons	Tons	Tons	Tons	Tons	Tons	Tons
Stationær forbrænding	0,13	1,8	0,57	1,2	1,2	0,53	21
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	0,05	1,9	0,02	0,17	0,17	2,0	2,2
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	0	0,01	0	0	0	0	0
Vejtransport	0,03	6,2	0,05	1,3	0,21	41	28
Andre mobile kilder*	0	0,04	0,01	0,01	0,02	0,02	1
Affald	0	2,1	0,01	0,01	0,01	0,07	8,3
Landbrug	0	0,01	0,05	0	0	0	0,03
Samlet	0,23	12	0,71	2,6	1,6	43	61

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

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

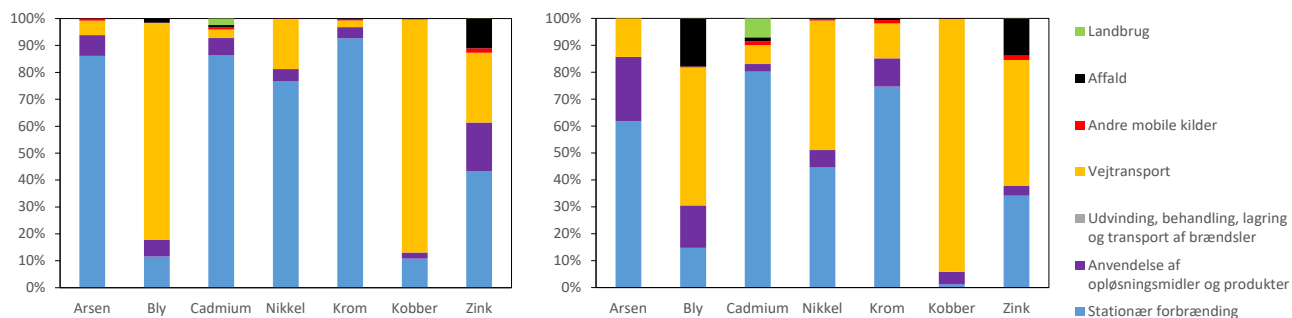
For arsen, nikkel og krom er der sket reduktioner på mellem 73 og 86%, hvilket navnlig skyldes forbedringerne i relation til forbrændingsanlæg. For cadmium er der sket en lidt mindre reduktion på omkring 42%. Faldet skyldes for en stor del fald i udledninger fra stationær forbrænding, men for cadmium 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 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

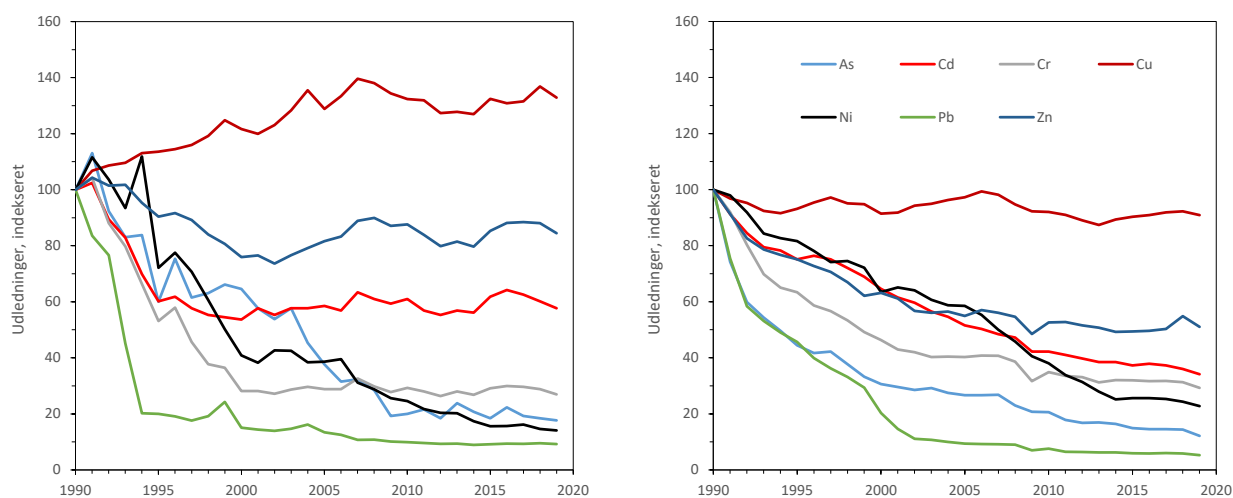
fald er stort set modsvaret af en øgning af udledningerne fra vejtransport, hvor zink kommer fra slid af bremses og dæk.

Kobber er i modsætning til de øvrige stoffer steget med omkring 33% siden 1990. Dette skyldes stigning i 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 et lille fald i udledningerne af kobber, og der er mere markante fald i udledningerne af zink og cadmium (Figur 9.2).



Figur 9.1. Den relative fordeling af kilderne til udledning af arsen, bly, cadmium, nikkel, krom, kobber og zink i 1990 (venstre) og 2019 (højre), (Nielsen et al., 2021).



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., 2021; CEIP, 2021). 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). TSP omfatter partikler, som har diameter op til 15-20 µm, mens PM₁₀ kun omfatter partikler med diameter op til 10 µm. Der er dermed noget forskel mellem de to partikelfraktioner, som bliver opsamlet ved de forskellige målestationer. Dette har dog mindre betydning i forbindelse med en vurdering af forskellen mellem niveauerne ved de forskellige typer af målestationer.

Årsmiddelværdierne for de fire direktivbundne tungmetaller i 2020 ligger langt under grænse- og målværdier. Arsen og nikkel ligger på omkring 10% og bly og cadmium ligger på omkring 1% af grænse- og målværdierne.

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

Tabel 9.3 viser årsmiddelværdierne for den samlede mængde kviksølv på gas- og partikelform ved målestationen på Råö ved Göteborg. 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 2020 for de fire tungmetaller (As, Pb, Cd og Ni) omfattet af EU's fjerde datterdirektiv (EU, 2004) samt seks andre udvalgte tungmetaller. Tabellen angiver endvidere EU's grænse- og målværdier for årsmiddelværdier af arsen, bly, cadmium og nikkel. For gade- og bybaggrundsmålestationer angives værdierne som massen af tungmetaller i PM₁₀, mens det for landbaggrundsmålestationer er tungmetaller i TSP (Total Suspended Particulate matter).

	Arsen As ng/m ³	Bly Pb ng/m ³	Cadmium Cd ng/m ³	Nikkel Ni ng/m ³	Krom Cr ng/m ³	Jern Fe ng/m ³	Kobber Cu ng/m ³	Mangan Mn ng/m ³	Vanadium V ng/m ³	Zink Zn ng/m ³
Grænseværdi/målværdi	6	500	5	20						
<i>Gade (PM₁₀)</i>										
København, H.C. Andersens Boulevard	0,4	2,1	0,06	1,5	7,2	1473	51	17	1,9	31
Aarhus, Banegaardsgade	0,4	1,3	0,05	0,7	1,8	421	16	5,9	1,1	14
<i>Bybaggrund (PM₁₀)</i>										
København	0,3	1,6	0,06	0,7	1,0	198	6,4	3,9	1,4	9,9
<i>Landbaggrund (TSP)</i>										
Anholt	0,3	1,0	0,04	0,5	0,4	70	1,6	2,1	1,2	5,5
Risø	0,4	1,4	0,05	0,5	0,8	112	2,3	3,2	1,1	6,8

Tabel 9.3. Årsmiddelværdier for kviksølv på gasform og partikelform ved Råö, Göteborg, Sverige. Målingerne er foretaget af Swedish Environmental Research Institute, Göteborg (Blomgren, 2020).

	Kviksølv, samlet gasform (ng/m ³)	Kviksølv, samlet partikelform (ng/m ³)
Råö, Göteborg, Sverige	1,3	0.016

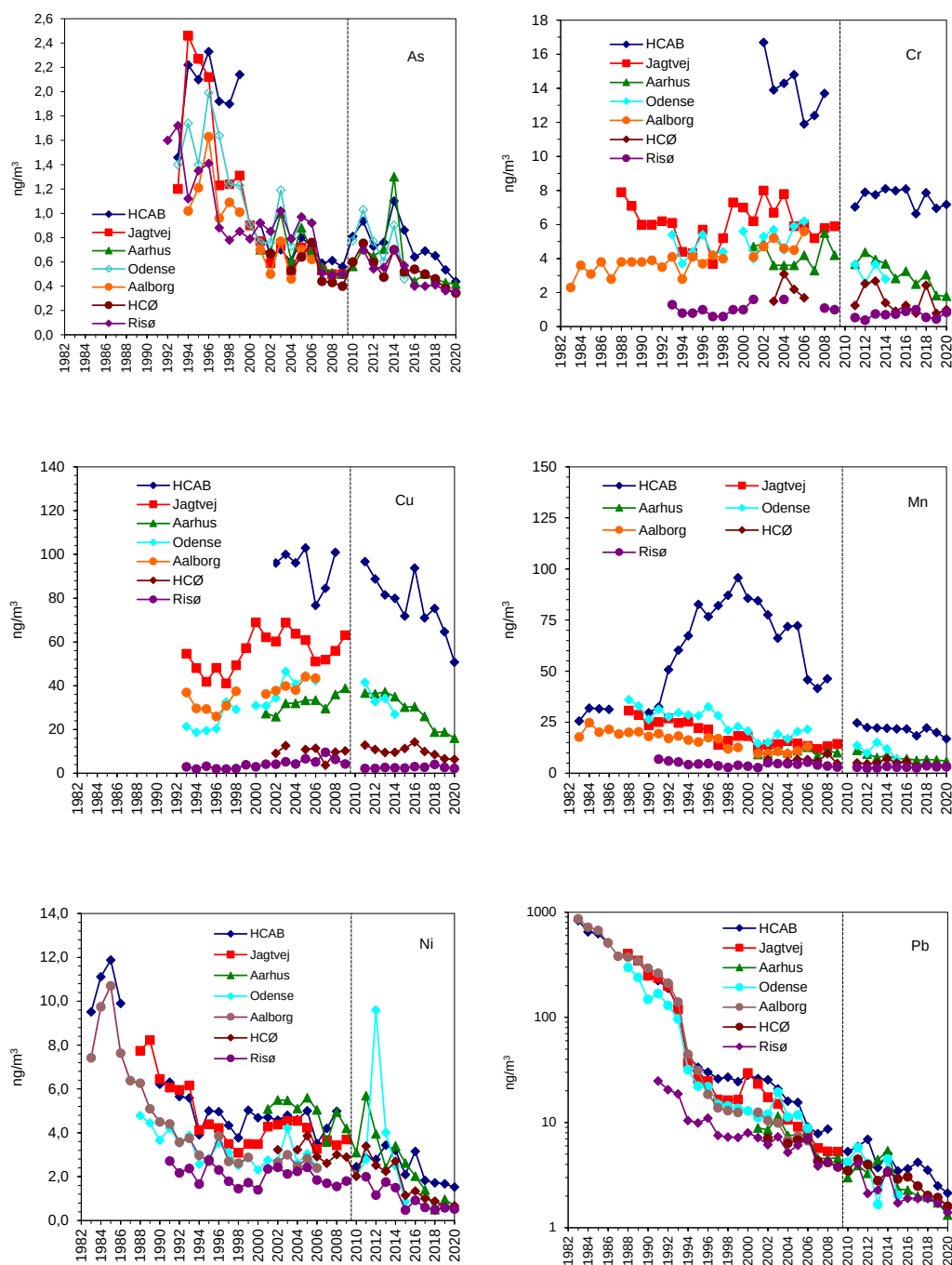
9.3 Udviklingstendens

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 Boulevard (Figur 9.3), da vejbelægningen ud for målestationen frem til 2009 indeholdt slagger fra stålvalseværket i Frederiksværk (vejen blev nyasfaltert i 2009).

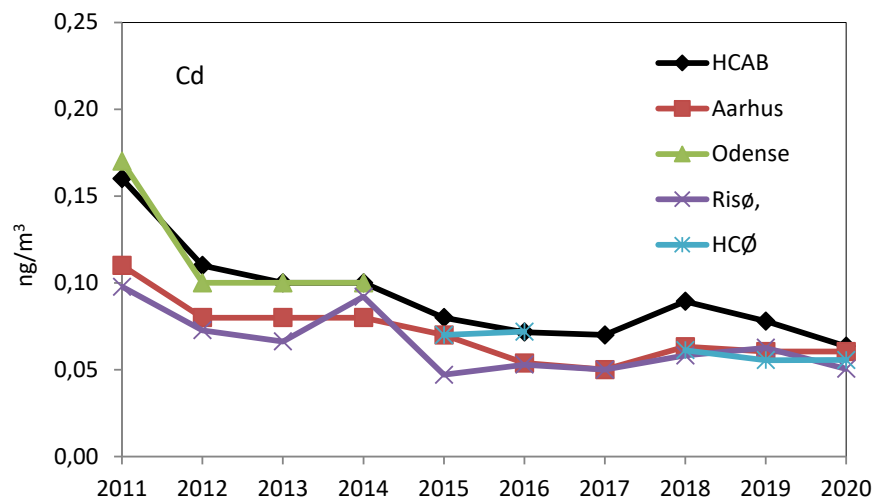
For hovedparten af stofferne er der sket et betydeligt fald i koncentrationerne. Mest markant for bly, hvor koncentrationen er faldet med mere end 99% siden 1982 på H.C. Andersens Boulevard. Arsen er faldet med omkring 75% siden 1990 og nikkel med omkring 75% siden 1982. Mangan er faldet med omkring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

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

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



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



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

10. Polycykliske aromatiske kulbrinter og benz[a]pyren

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

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

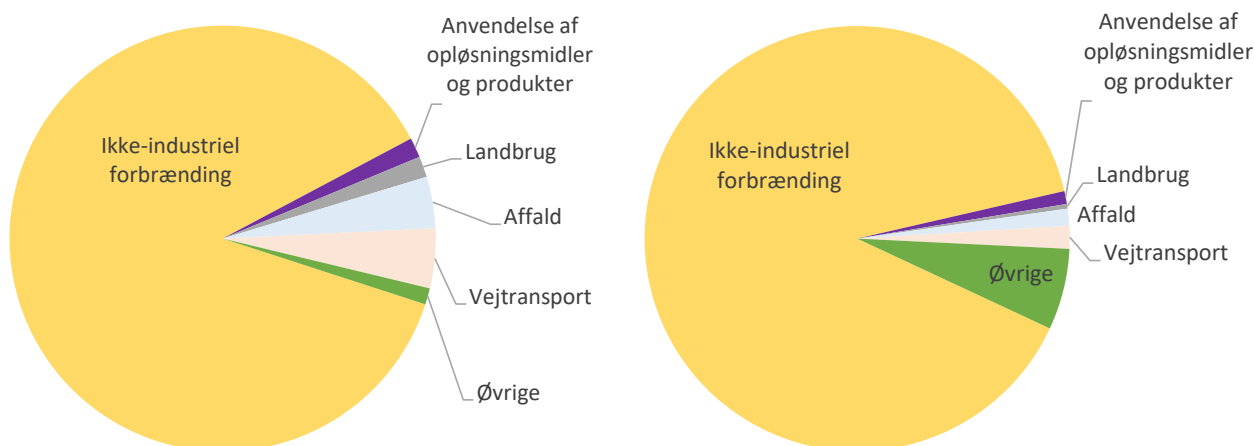
Status og udvikling i luftkoncentrationer af polycykliske aromatiske kulbrinter overvåges i 2019 ved målinger på en gademålestation i København (H.C. Andersens Boulevard) og på forstadsmålestationen i Hvidovre. Det er kun den partikelbundne del af disse polycykliske aromatiske kulbrinter som indgår i overvågningsprogrammet, men denne fase er også langt den vigtigste under danske udendørsforhold.

10.1 Udledninger

Opgørelser af udledningerne af benz[a]pyren viser, at ikke-industriel forbrænding er langt den vigtigste kilde (omkring 87%), og at anvendelse af brændefyring til boligopvarmning alene står for næsten trefjerdedele (omkring 77%) af de danske udledninger i 2019 (Figur 10.1 og tabel 10.1; Nielsen et al., 2021). 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 60% set over hele perioden fra begyndelsen af 1990'erne til 2018 (Figur 10.2; Nielsen et al., 2021). Udviklingen i udledningen har dog været meget ujævn med en markant transient top i 2007, hvor udledningen næsten var på højde med udledningen fra begyndelsen af 1990'erne. Faldet i udledningen er for langt hovedparten opnået via forbedringer af brændeovne og brændekedler samt i de seneste år også ved et markant nedsat brændeforbrug. Ifølge Energistyrelsen er brændeforbrug faldet med 35% siden 2016 (Energistyrelsen, 2020).

For EU-27 er det også den ikke-industrielle forbrænding, som står for hovedparten af udledningerne (omkring 89%; Figur 10.1). For EU-27 er det øvrige kilder, vejtransport og affald, som er de næst vigtigste kilder. Udledningerne fra EU-27 er faldet med omkring 50% siden 1990, hvilket er lidt mindre end i Danmark (Figur 10.2). Igen er det faldet i udledningerne fra ikke-stationær forbrænding, som har haft størst betydning for faldet i de samlede udledninger.

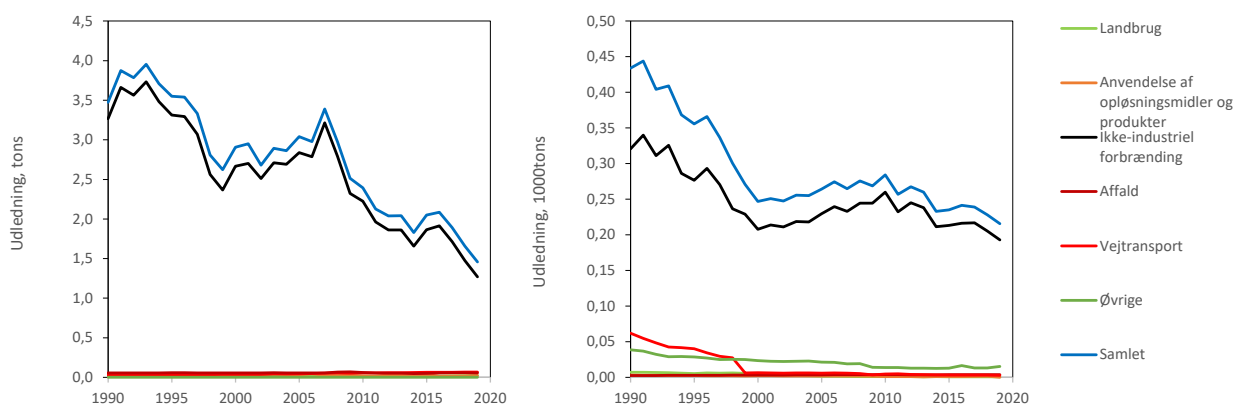


Figur 10.1. Kilderne til menneskeskabte udledninger af benz[a]pyren i Danmark (venstre) og EU-27 (højre) i 2019. Figureerne viser de fem vigtigste kilder i Danmark, mens de resterende kilder er vist samlet under "Øvrige" (Nielsen et al., 2021, CEIP, 2021).

Tabel 10.1. Kilderne til de menneskabte udledninger af benz[a]pyren i Danmark i 2019 (Nielsen et al., 2021). 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 2019	
		Tons	%
Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	1	0,0	1
Ikke-industriel forbrænding	2	1,3	87
<i>Handel og service</i>	201	0,1	5
<i>Husholdninger</i>	202	1,1	77
<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	203	0,1	5
Fremstillingsvirksomhed og byggeri	3	0,0	0
Industrielle processer	4	0,0	0
Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	5	0,0	0
Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	6	0,0	2
Vejtransport	7	0,1	5
<i>Udstødning</i>	701-706	0,1	4
<i>Ikke-udstødning</i>	707-708	0,0	0
Andre mobile kilder*	8	0,0	0
Affald	9	0,1	4
Landbrug	3b,d,f-i	0,0	2
Samlet		1,5	100

* Data inkluderer national søfart, al flyvning under 3000 fod, togtrafik, også 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., 2021; CEIP, 2021).

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 margin. De højeste koncentrationer blev i 2019 målt ved forstadsmålestationen i Hvidovre, hvilket hænger sammen med, at denne målestation er placeret i et parcelhusområde med en vis anvendelse af brændefyring. I 2020 er koncentrationerne af benz[a]pyren omtrent lige høje om end koncentrationerne er lidt højere ved målestationen i Hvidovre. Ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard kommer hovedparten af benz[a]pyren ligeledes fra brændevogne med et mindre bidrag fra den intense trafik på H.C. Andersens Boulevard. For de øvrige polycykliske aromatiske hydrocarboner ses også at niveauet er nogenlunde ens på de to målestationer - om end det varierer fra forbindelse til forbindelse (Tabel 10.2).

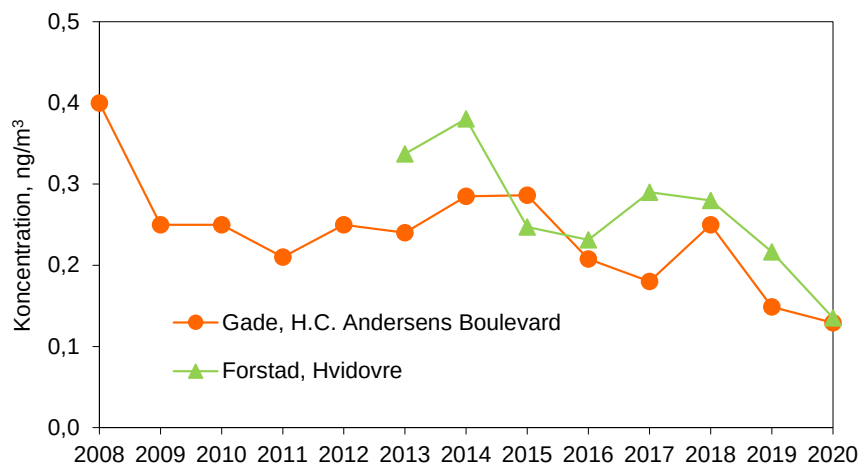
Tabel 10.2. Årsmiddelværdi for benz[a]pyren og fem udvalgte polycykliske aromatiske kulbrinter i 2020. Endvidere angives målværdi for årsmiddelværdien af benz[a]pyren (EU, 2004). Af analysetekniske årsager kan benz[b]fluoranthren og benz[k]fluoranthren ikke separeres og de angives derfor som en sum.

	Benz[a]- pyren ng/m ³	Benz[a]- anthracen ng/m ³	Benz[b+k]- fluoranthren ng/m ³	Benz[j]- fluoranthren ng/m ³	Indeno[1,2,3- cd]-pyren ng/m ³	Dibenz[a,h]- anthracen ng/m ³
Målværdi	1					
<i>Gade</i>						
København, H.C. Andersens Boulevard	0,13	0,10	0,27	0,11	0,14	0,09
<i>Forstad</i>						
Hvidovre	0,14	0,10	0,09	0,29	0,17	0,07

10.3 Udviklingstendens

Figur 10.3 viser udviklingstendens for årsmiddelværdien af benz[a]pyren siden opstart af målingerne på H.C. Andersens Boulevard i 2007 og Hvidovre i 2013. For begge målestationer ses et fald. På H.C. Andersens Boulevard er årsmiddelkoncentrationen faldet med omkring 48% og ved forstadsmålestationen i Hvidovre ses et fald på omkring 62% siden 2013. Faldet i Benz[a]pyren på de to målestationer er i god overensstemmelse med faldet i de danske udledninger af benz[a]pyren, hvor der navnlig i de seneste år er set et relativt stort fald i udledningerne blandt andet som følge af et 35% fald i brændeforbrug siden 2016 (Energistyrelsen, 2020).

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



Figur 10.3. Udviklingstendens for årsmiddelværdierne for benz[a]pyren ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard og forstadsmålestationen i Hvidovre.

11. Den kemiske sammensætning af fine partikler

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

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

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

11.1 Kilderne til de uorganiske ioner

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

Primære

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

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

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

Sekundære

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

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

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

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

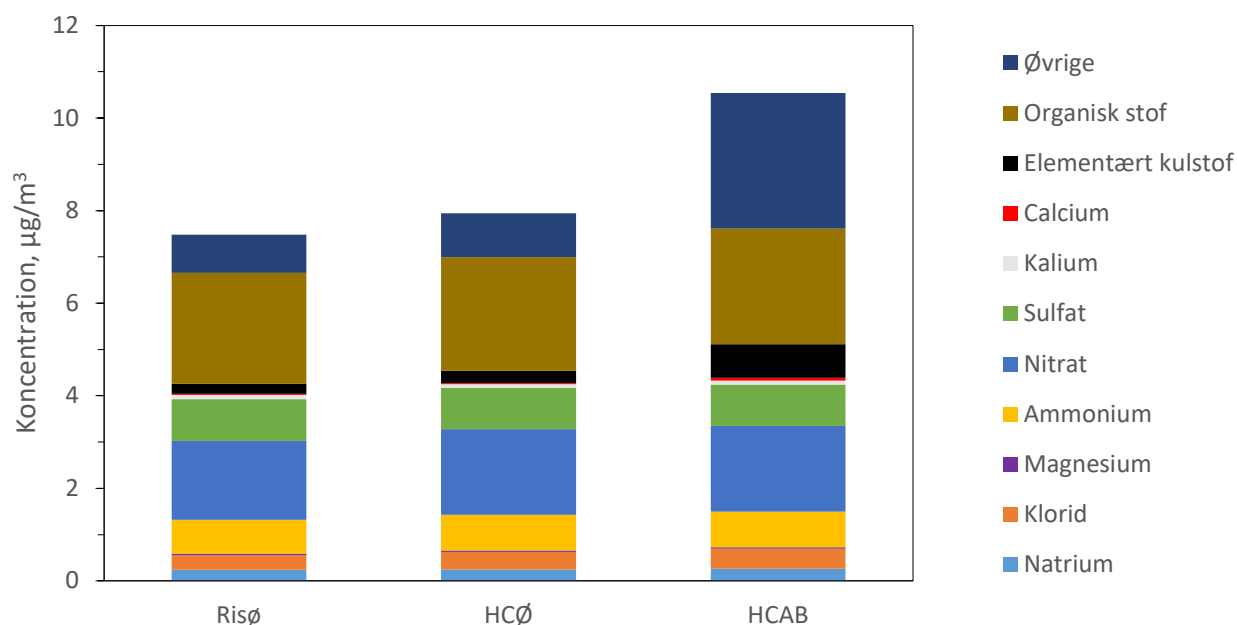
De uorganiske ioner i de fine partikler bliver overvåget med målinger foretaget på landbaggrundsmålestationen ved Risø. Frem til og med 2016 blev der også foretaget tilsvarende målinger ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard. Der var kun lille forskel mellem koncentrationerne målt på de to målestationer (Ellermann et al., 2017). Årsagen til dette er, at disse partikelkomponenter hovedsageligt er langtransporteret, hvilket er grunden for, 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 2020

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 54% af indholdet i de fine partikler på landbaggrundsmålestationen, 54% på bybaggrundsmålestationen og 42% på gademålestationen. De ensartede koncentrationsniveauer skyldes som nævnt tidligere, at de uorganiske ioner for langt størstedelen er langtransporteret via atmosfæren.

Elementært kulstof udgør kun en meget lille andel af de fine partikler i land- og bybaggrund (3%), mens det udgør 7% 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 24% og 32% af den samlede mængde fine partikler (se Kapitel 8 for yderligere informationer om elementært kulstof og organisk stof).

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



Figur 11.1. Årsmiddelkoncentrationer for de kemiske komponenter i de fine partikler ($PM_{2,5}$) ved landbaggrundsmålestationen ved Risø, bybaggrundsmålestationen på H.C. Ørsted Instituttet og gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard i 2020. For bybaggrundsmålestationen og gademålestationen er data for en stor del baseret på estimer. De estimerede koncentrationer fremgår af Tabel 11.1. Kategorien Øvrige omfatter de kemiske komponenter, som der ikke bliver lavet analyser for.

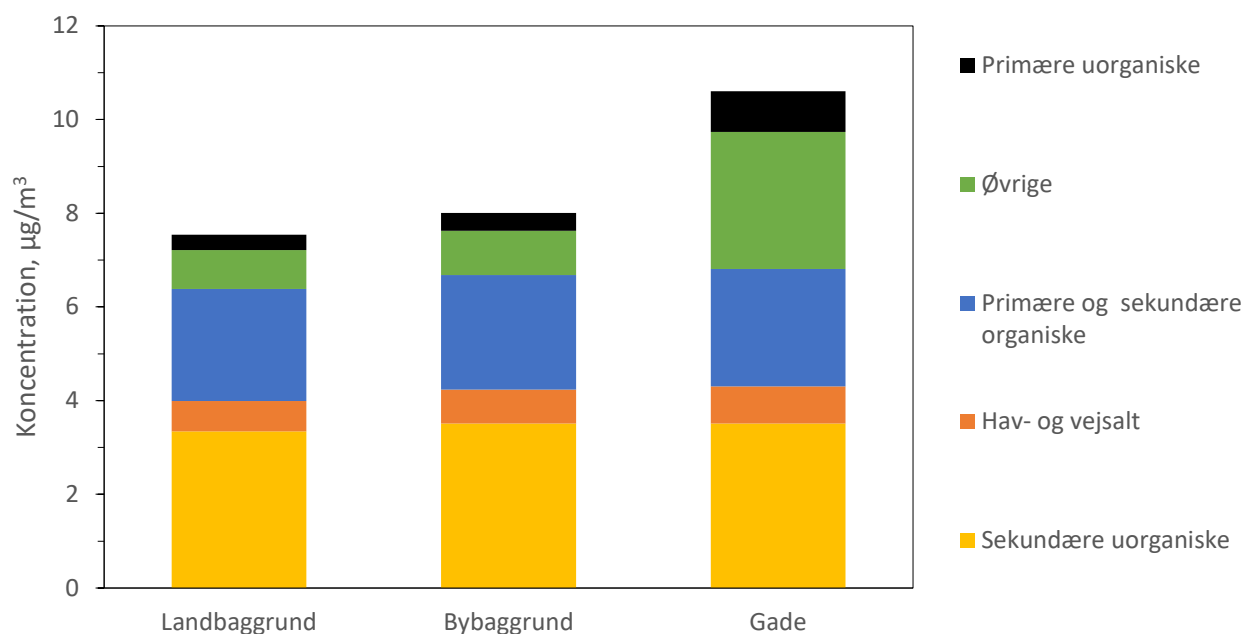
Tabel 11.1. Årsmiddelkoncentrationer for de kemiske komponenter i de fine partikler ($PM_{2,5}$) ved landbaggrundsmålestationen ved Risø, bybaggrundsmålestationen på H.C. Ørsted Instituttet og gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard i 2020. Til sammenligning vises den samlede mængde fine partikler ($PM_{2,5}$). For bybaggrundsmålestationen og gademålestationen er data for en stor del baseret på estimer. De estimerede koncentrationer er vist med rødt i tabellen. Øvrige omfatter de kemiske komponenter, som der ikke analyseres for.

	Landbaggrund Risø µg/m3	Bybaggrund HCØ µg/m3	Gade HCAB µg/m3
$PM_{2,5}$	7,5	7,9	10,5
Natrium	0,24	0,25	0,27
Klorid	0,32	0,37	0,43
Magnesium	0,03	0,03	0,03
Ammonium	0,73	0,8	0,8
Nitrit	1,7	1,8	1,8
Sulfat	0,9	0,9	0,9
Kalium	0,09	0,08	0,08
Calcium	0,02	0,02	0,07
Elementært kulstof	0,22	0,27	0,7
Organisk stof	2,4	2,4	2,5
Øvrige	0,8	0,9	2,9

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 (33-45%; 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 (9%), de primære og sekundære organiske partikelkomponenter (24-32%) og gruppen af øvrige partikelkomponenter (11-28%) 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 (8%) end i landbaggrund og bybaggrund (begge omkring 4,5%). Elementært kulstof, som for en stor dels vedkommende stammer fra vejtrafik, udgør hovedparten af de primære uorganiske partikelkomponenter, hvilket er årsagen til den markant højere værdi på H.C. Andersens Boulevard.

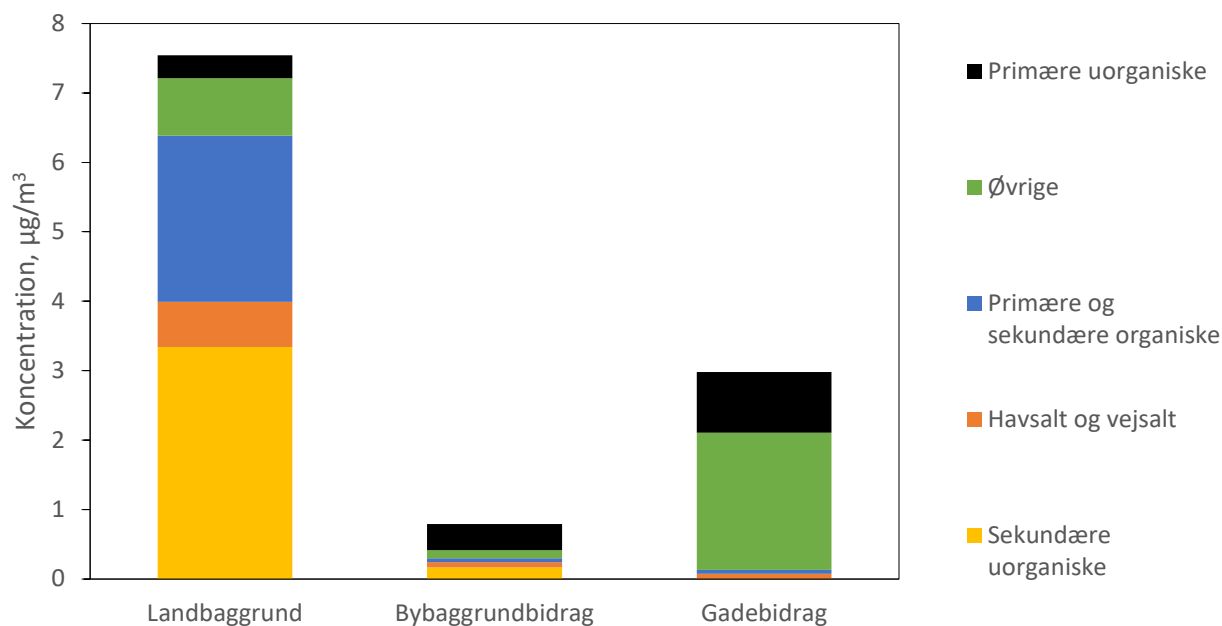


Figur 11.2. Årsmiddelkoncentrationer for de kemiske komponenter opdelt i grupper ved landbaggrundsmålestationen ved Risø, bybaggrundsmålestationen på H.C. Ørsted Instituttet og gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard i 2020. For bybaggrundsmålestationen og gademålestationen er data for en stor del baseret på estimater. De estimerede koncentrationer fremgår af Tabel 11.2.

Tabel 11.2. Årsmiddelkoncentrationer for de kemiske komponenter opdelt i grupper ved landbaggrundsmålestationen ved Risø, bybaggrundsmålestationen på H.C. Ørsted Instituttet og gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard i 2020. Til sammenligning vises også den samlede mængde fine partikler ($PM_{2,5}$). For bybaggrundsmålestationen og gademålestationen er data for en stor del baseret på estimater (se Tabel 11.1).

	Landbaggrund Risø µg/m3	Bybaggrund HCØ µg/m3	Gade HCAB µg/m3
$PM_{2,5}$	7,5	7,9	10,5
Hav- og vejsalt	0,65	0,72	0,80
Primære uorganiske	0,33	0,38	0,9
Sekundære uorganiske	3,3	3,5	3,5
Primære og sekundære organiske	2,4	2,4	2,5
Øvrige	0,8	0,9	2,9

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 71% fra landbaggrund, mens bybaggrund og gadebidrag står for henholdsvis omkring 4% og 25%. De sekundære uorganiske partikelkomponenter, hav- og vejsalt, primære og sekundære organiske partikelkomponenter kommer overvejende fra landbaggrund. Den største del af gruppen af øvrige partikelkomponenter ses ved landbaggrund, hvilket kunne hænge sammen med, at indholdet af vand i partiklerne primært er associeret med gruppen af hydrofile uorganiske ioner. De primære uorganiske partikelkomponenter (navnlig elementært kulstof) bidrager mest til gadebidraget, hvilket igen stemmer med det store bidrag fra vejtrafik. De primære uorganiske partikelkomponenter udgør således omkring 19% af gadebidraget til partikelforureningen ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard.



Figur 11.3. Årsmiddelkoncentrationer i 2020 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 estimer, som baggrund for de viste tal (se Tabel 11.1).

Luftkoncentrationerne af fine partikler lå 20-30% lavere i 2020 end i 2019, som det også fremgår af kapitel 7. Faldet i den samlede mængde fine partikler skyldes fald for hovedparten af de kemiske komponenter, som er aftaget med mellem 10 og 20% fra 2019 til 2020. For hav- og vejsalt er der sket en svag stigning (omkring 8%), hvilket hænger sammen med år til år variationerne i de meteorologiske forhold, idet navnlig havsalt varierer meget som følge af blandt andet mængden af storme i løbet af et år. De primære uorganiske partikler (hovedsageligt elementært kulstof) er faldet med omkring 28% for gadebidraget, hvilket kan hænge sammen med effekten af COVID-19-restriktionerne, som medførte betydelig reduktion i vejtrafikken i 2020. Ud over dette er de øvrige komponenter faldet med omkring 65% for landbaggrund og bybaggrund.

Samlet set skyldes faldet fra 2019 til 2020 de generelle fald i udledningerne, år til år variationer i de meteorologiske forhold og COVID-19-restriktionernes reduktion i samfundsaktiviteterne og dermed de menneskeskabte udledninger. Det har ikke været muligt at fastlægge hvor stor en del af faldet som alene skyldes COVID-19-restriktionerne.

12. Helbredseffekter og eksterne omkostninger relateret til luftforurening

Ifølge WHO er luftforurening nu anset for at være verdens største enkeltstående miljørelaterede sundhedsrisiko. Omkring 4.2 millioner mennesker døde for tidligt i 2016 som følge af eksponering for udendørs luftforurening (WHO, 2021b). Nyere forskning tyder dog på, at antallet af for tidlige dødsfald, som følge af udendørs luftforurening snarere er knapt 9 millioner mennesker for 2015 globalt set (Burnett et al., 2018; Lelieveld et al., 2019). Denne omfattende effekt af luftforurening på den menneskelige sundhed er årsagen til, at modelberegninger af helbredseffekter af luftforurening og tilhørende eksterne 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 2020. Beregningerne er gennemført for 2020 på basis af meteorologiske data for 2020, udledningsdata for 2019 for Danmark og udledningsdata for 2018 for Europa, hvilket svarer til de senest opdaterede datasæt på det tidspunkt, hvor beregningerne er gennemført. Udledningsdata for Europa opdateres lidt senere end danske udledninger. Modelberegninger er gennemført med modelsystemet EVA5.2, som er en integreret del af multi-skala modelsystemet DEHM/UBM til beregning af luftforurening. EVA5.2 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 EVA5.2 systemet, se kapitel 1.5. Beregningerne er foretaget med samme version af modelsystemet, som NOVANA-beregningerne for 2019 (Ellermann et al., 2021).

Beregningerne er udført ved, at der først er gennemført modelberegninger for alle kilder, og dernæst modelberegninger, hvor udledningerne fra hver enkelt udledningssektor er reduceret, en ad gangen, med 30% både for Danmark og Europa. Bidraget fra den enkelte udledningssektor er så beregnet ud fra forskellen mellem luftkoncentrationerne, når alle kilder er inkluderet, og luftkoncentrationerne, når den pågældende sektors og det pågældende områdes (Danmark eller Europa) kilder er reduceret med 30% i beregningerne og derefter skaleret op til 100% (se næste afsnit). For international skibstrafik og naturlige kilder er reduktionen foretaget for hele modelområdet, som omfatter den nordlige halvkugle.

Den specifikke procentsats, der vælges til reduktion af emissionerne, er et kompromis imellem, om man ønsker at studere en marginal ændring, eller om man ønsker at vide, hvor meget den enkelte emissionssektor reelt bidrager til helbredseffekterne og de relaterede eksterne 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 atmosfærisk kemi) vil størrelsen af procentsatsen have indflydelse på resultatet. En 100% reduktion vil i nogle tilfælde give anledning til store ændringer, som ikke er skalérbare til marginale emissionsreduktioner. De 30% er valgt ud fra en betragtning af, at når vi analyserer danske udledningssektors bidrag til helbredseffekter og

eksterne 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, om de danske emissionssektorer bliver reduceret med 30% eller 100%.

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

I det følgende er modelsystemet DEHM/UBM benyttet til at beregne bidragene til luftkoncentrationerne for forskellige stoffer fra danske og europæiske kilder opdelt på forskellige emissionssektorer i henhold til den opdeling, der anvendes internationalt og i de danske udledningsopgørelser; Selected Nomenclatur for Air Pollution (SNAP). Desuden er bidragene fra international skibstrafik og naturlige kilder fra hele den nordlige halvkugle beregnet. Med udgangspunkt i beregningerne af kildeopsplitning på luftkoncentrationer, er der udført beregninger med EVA5.2 modelsystemet, som muliggør adskillelse af helbredseffekterne og relaterede eksterne 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 eksterne omkostninger. I afsnit 12.3 er den detaljerede kildeopgørelse til helbredseffekter vist og afsnit 12.4 omhandler tilsvarende de relaterede eksterne 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, svovldioxid og ozon. Af disse komponenter, er $PM_{2.5}$, kvælstofdioxid og ozon de tre, som oftest analyseres i studier af eksterne 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 har anbefalet at anvende i relation til estimering af helbredseffekter fra luftforurening) anvendes i beregningerne med EVA5.2-systemet for 2020.

I efteråret 2020 udkom et nyt review-studie af Chen and Hoek (2020), hvor det på baggrund af nyere forskning konkluderes, at 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 på 29% i forhold til den tidligere værdi. Nyere danske studier underbygger den relative risiko til at være 8% (Hvidtfeldt et al., 2019; Raaschou-Nielsen et al., 2020; So et al., 2020). Den 22/9- 2021, udkom desuden nye retningslinjer fra WHO (WHO, 2021a), som nu også anbefaler en relativ risiko på 8%. Vi har i denne rapport ikke implementeret de nye retningslinjer, da de udkom, mens rapporten var under udarbejdelse og derfor vil resultaterne i denne rapport for dødelighed være underestimeret i forhold til de nye retningslinjer fra WHO for $\text{PM}_{2,5}$. For NO_2 og O_3 er der også nye retningslinjer, som vil blive implementeret i EVA systemet, og som vil påvirke beregningerne af for tidlige dødsfald.

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 eksterne 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 eksterne 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 eksterne omkostninger med lidt forskelligt udgangspunkt. I forbindelse med sidste års afrapportering har vi indført en mere grundlæggende ekstra analyse af, hvor stor den procentuelle forskel er mellem målinger og modelberegninger, når så mange tilgængelige målinger som muligt inkluderes. Resultatet af analysen er, at $\text{PM}_{2,5}$ -koncentrationen beregnet med modellerne skal opjusteres med 33% for at matche målingerne. Dette tal er fremkommet på baggrund af årsmiddelværdier for årene 2017-2019 fra 8 målestationer i Danmark for $\text{PM}_{2,5}$ baseret på EU's referencemålemetode, og må derfor betegnes som robust. En tilsvarende undersøgelse for perioden 2018-2020 har ikke givet anledning til at ændre på dette tal. I takt med, at modellerne bliver bedre, og derfor kommer nærmere på at lukke massegab, 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 eksterne

omkostninger. I rapporten her indgår den manglende PM_{2,5}-masse sammen med sekundære organiske og uorganiske partikler, samt havsalt under betegnelsen "Øvrig PM_{2,5}". Betegnelsen PPM_{2,5}, som også vil fremgå af tabellerne, indeholder den menneskeskabte del af de primært emitterede partikler, og består af mineralsk støv, black carbon og organisk stof. Den totale PM_{2,5} er summen af PPM_{2,5} og øvrig PM_{2,5}.

12.1 Status og trends for helbredseffekter

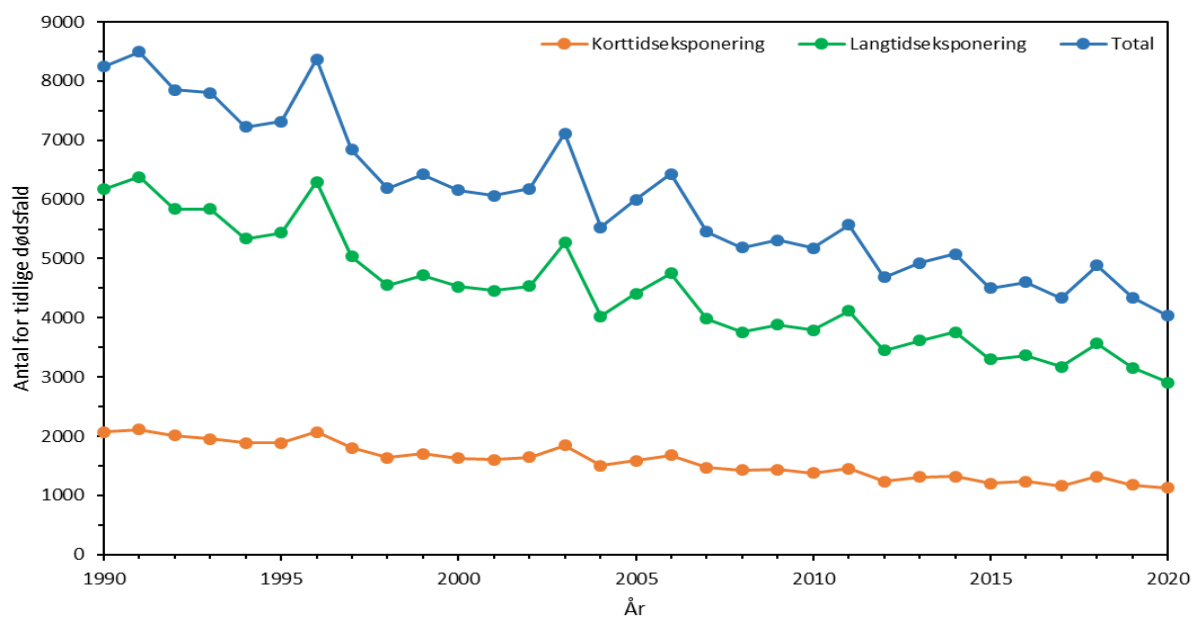
Tabel 12.1 viser resultatet af beregningen af helbredseffekter af luftforurening i Danmark med modelsystemet EVA5.2. Resultaterne er angivet for de forskellige helbredsudfald (både dødelighed og sygelighed), som er inkluderet i modelsystemet, og viser middelværdier for den treårige periode fra 2018-2020. 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 10,6 tabte leveår (se Brandt et al., 2013a; b).

Det samlede antal tilfælde af for tidlig død, som følge af luftforurening, beregnes til omkring 4.420 tilfælde i Danmark som årligt gennemsnit for 2018-2020 (Tabel 12.1). Helbredseffekten af eksponering for PM_{2,5} resulterer i omkring 3970 tilfælde af for tidlig død, kvælstofdioxid resulterer i omkring 350 tilfælde af for tidlig død, eksponering for ozon i omkring 90 tilfælde og eksponering for svovldioxid i under 10 tilfælde af for tidlig død.

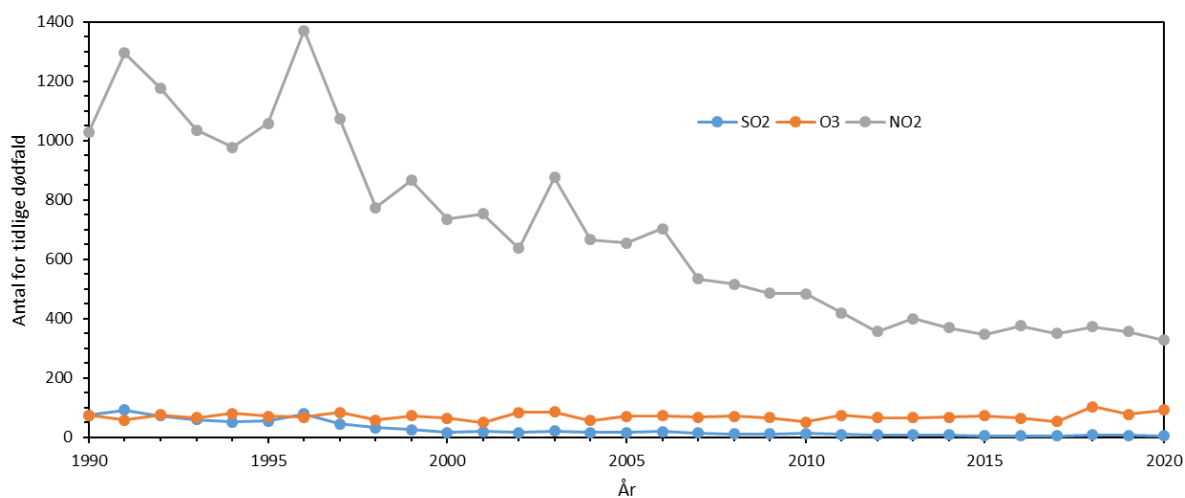
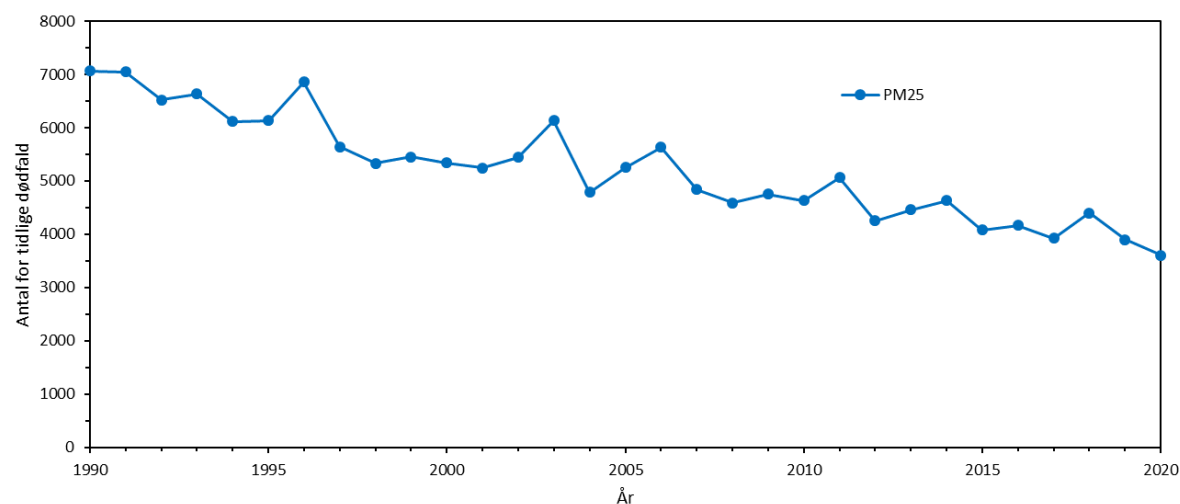
Tabel 12.1 Antal tilfælde af helbredseffekter som følge af luftforureningen i Danmark. Beregningerne er udført med EVA5.2 modelsystemet, og tallene angiver gennemsnittet for perioden 2018-2020 for hele Danmark opdelt på luftforureningskomponenterne svovldioxid (SO₂), ozon (O₃), kvælstofdioxid (NO₂), primær PM_{2,5}, øvrig PM_{2,5}, og PM_{2,5} (sum af primær og øvrig PM_{2,5}).

Helbredseffekt	Antal tilfælde						Total*
	SO ₂	O ₃	NO ₂	PPM _{2,5}	Øvrig PM _{2,5}	PM _{2,5}	
For tidlig død (korttidseksponering)	7	91	352	120	639	759	1200
For tidlig død (langtidseksponering)			0	606	2600	3210	3210
For tidlig død (total)	7	91	352	726	3240	3970	4420
Hospitalsindlæggelser, åndedrætsbesvær		125	1560	298	1270	1570	3250
Hospitalsindlæggelser, hjertekarsygdomme		405		209	890	1100	1500
Hoste børn				72	307	379	378
Kronisk bronkitis voksne				607	2590	3190	3190
Kronisk bronkitis børn				2240	13100	15400	15400
Tabte arbejdsdage				56600	243000	300000	300000
Dage med restriktioner i aktivitet				746000	3180000	3930000	3930000
Dage med mindre restriktioner i aktivitet		1060			0	0	1060
Lungekræft				11	48	59	59
Spædbarnsdød					1	1	1

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



Figur 12.1. Det samlede antal tilfælde af for tidlige dødsfald som følge af den samlede luftforurening af PM_{2,5}, ozon (O₃) kvælstofdioxid (NO₂) og svovldioxid (SO₂) i Danmark, samt antal tilfælde fordelt på langtids- og korttidseksponering. Beregningerne er foretaget med EVA5.2.



Figur 12.2. Antal tilfælde af for tidlige dødsfald fordelt på luftforureningskomponenterne PM_{2,5} (øverst) og kvælstofdioxid (NO₂), ozon (O₃) og svovldioxid (SO₂) (nederst) i Danmark. Beregningerne er foretaget med EVA5.2.

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 89% af tilfældene af for tidlig død, kvælstofdioxid for omkring 7,9%, ozon for omkring 2% og svovldioxid for omkring 0,1% som gennemsnit over de tre år fra 2018-2020.

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} er relativt lille, fordi størstedelen af PM_{2,5} kommer fra langtransport af luftforurening fra navnlig den nordlige del af det europæiske kontinent og dette giver syd til nord gradienten. Desuden er kvælstofdioxidkoncentrationerne højere i de større byer og PM_{2,5} er lidt højere i byerne, hvilket samlet giver en lidt større risiko i byerne (10-20%).

Udviklingstendensen for de for tidlige dødsfald som følge af både korttids- og langtidseksponering er beregnet for perioden 1990-2020 med EVA5.2 modelsystemet ved at gennemføre beregninger for hvert enkelt år i perioden under antagelse af konstante populationsdata. I figur 12.1 er denne udviklingstendens præsenteret, og det ses, at det samlede antal tilfælde af for tidlig død er faldet fra omkring 8.200 tilfælde per år i 1990 til omkring 4.000 tilfælde per år i 2020. Dette svarer til en reduktion på omkring 50%. Årsagen til dette fald er reduktionerne i koncentrationerne af luftforureningen (se blandt andet afsnit 2.3 og 7.3). Tallet i 2020 er desuden relativt lille (ca. 4.000 tilfælde) pga. COVID-19 restriktionerne, både i Danmark og i Europa og den generelle reduktion i udledningerne. Variationer fra år til år skyldes naturlige variationer i de meteorologiske forhold. Figur 12.2 viser udviklingstendenserne for antallet af for tidlige dødsfald fordelt på PM_{2,5}, kvælstofdioxid, ozon og svovldioxid. Ændringerne i antal tilfælde følger generelt ændringerne i luftkoncentrationerne.

Med modellerne i EVA5.2 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 2020 er ansvarlige for omkring 3.170 for tidlige dødsfald (svarende til omkring 79%), mens de danske kilder er ansvarlige for omkring 860 for tidlige dødsfald (21%). Det sidste tal er lidt lavere end tallet opgjort for 2019 på omkring 1.100 for tidlige dødsfald relateret til danske kilder (Ellermann et al., 2021), hvilket skyldes en generel nedgang i emissionerne i Danmark, bl.a. pga. COVID-19 restriktionerne i 2020. Det skyldes også en ændring i beregningsmetoden, idet tallet for 2019 inkluderede alle emissioner

i UBM modellens domæne (herunder emissioner fra både dansk og international skibstrafik), mens tallet for 2020 kun indbefatter landbaserede emissioner og emissioner fra dansk skibsfart.

De danske udledninger bidrager ikke alene til helbredseffekter i Danmark, men også til omkring 1.930 for tidlige dødsfald årligt i de øvrige europæiske lande i 2020. "Import" af helbredseffekter relateret til luftforurening er derfor omkring 39% større end "eksport" fra Danmark til de øvrige lande. Af resultaterne i tabellen ses også, at de danske udledninger forårsager omkring 55% færre tilfælde af for tidlige dødsfald i Danmark (omkring 860) i forhold til, hvad de danske udledninger forårsager i udlandet (omkring 1.930) grundet grænseoverskridende langtransport af luftforurening.

Tabel 12.2. Bidrag fra udledninger i udlandet og Danmark til antal tilfælde af for tidlige dødsfald i Danmark og Europa. Beregningerne er foretaget med EVA5.2 modelsystemet for år 2020 (tallene er afrundet).

Bidrag	Antal tilfælde af for tidlig død	% af samlet
Samlet luftforurening i Danmark	4.030	100
Udlandets bidrag til Danmark	3.170	79
Danmarks bidrag til Danmark	860	21
Danmarks bidrag til Europa inkl. Danmark	2.790	100
Danmarks bidrag til Europa ekskl. Danmark	1.930	69

12.2 Status for eksterne omkostninger som følge af helbredseffekter

Tabel 12.3 viser de årlige eksterne omkostninger som følge af helbredseffekter af luftforureningen i Danmark for år 2020. Den eksterne omkostning er den omkostning, som produktion eller forbrug af en vare eller en tjenesteydelse pålægger en tredje part. I denne sammenhæng er det aktiviteter, som giver udledninger af luftforurening og dermed effekter på helbred, som til sidst resulterer i ekstra samfundsøkonomiske omkostninger.

De samlede eksterne omkostninger relateret til luftforurening i Danmark er estimeret til omkring 76 milliarder kr. for år 2020, hvilket er omkring 9 milliarder kr. mindre end for 2019. Den økonomiske værdisætning af forskellige helbredseffekter er her baseret på Andersen et al. (2019) og angivet i 2016-priser. Udviklingstendensen for de samlede eksterne omkostninger er meget lig udviklingstendensen for antal tilfælde af for tidlig død, så derfor er den ikke præsenteret her.

Den samlede helbredsrelaterede eksterne omkostning var omkring 115 milliarder kr. som middel over årene 1988-1990, og den er dermed faldet med omkring 34%.

Tabel 12.3 viser også fordelingen af de helbredsrelaterede eksterne omkostninger på bidraget fra henholdsvis udledninger i udlandet og udledninger i Danmark. Bidraget fra udlandet estimeres til 58 milliarder kr. (77% af de samlede helbredsrelaterede omkostninger i Danmark), mens bidraget fra danske udledninger udgør omkring 17 milliarder kr. i Danmark (23%). Bidraget fra danske udledninger til de helbredsrelaterede eksterne omkostninger i Europa eksklusiv Danmark er beregnet til omkring 34 milliarder kr.

Tabel 12.3. Bidrag fra udledninger fra udlandet til Danmark og bidraget fra udledninger i Danmark til de totale helbredsrelaterede eksterne omkostninger, beregnet med EVA5.2 modelsystemet for år 2020.

Bidrag	Mia. DKK	% af total
Samlet luftforurening i Danmark	76	100
Udlandets bidrag til Danmark	58	77
Danmarks bidrag til Danmark	17	23
Danmarks bidrag til Europa inkl. Danmark	52	100
Danmarks bidrag til Europa ekskl. Danmark	34	66

12.3 Kilder til helbredseffekter af luftforureningen i Danmark i 2020

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 2020, hvor tabel 12.1 angiver data for gennemsnittet af 2018-2020. Samlet set giver luftforureningen anledning til omkring 4.030 for tidlige dødsfald i 2020, med PM_{2,5} som den største bidragsyder (omkring 3.600 for tidlige dødsfald) og kvælstofdioxid som den næststørste (omkring 330 for tidlige dødsfald). Ozon bidrager med omkring 90 for tidlige dødsfald.

Tabel 12.4. Helbredseffekter i Danmark i 2020 som følge af den samlede luftforurening, dvs. både danske og udenlandske kilder. Total er summen af helbredseffekter af svovldioxid (SO₂), ozon (O₃), kvælstofdioxid (NO₂), primær PM_{2,5}, øvrig PM_{2,5}, PM_{2,5} (sum af primær og øvrig PM_{2,5}) og total.

Helbredseffekt	Antal tilfælde						Total
	SO ₂	O ₃	NO ₂	PPM _{2,5}	Øvrig PM _{2,5}	PM _{2,5}	
For tidlig død (korttidseksposering)	6	93	328	104	594	699	1120
For tidlig død (langtidseksposering)			0,2	527	2380	2910	2910
For tidlig død (total)	6	93	328	632	2970	3610	4030
Hospitalsindlæggelser, åndedrætsbesvær		127	1430	259	1160	1420	2980
Hospitalsindlæggelser, hjertekarsygdomme		412		182	813	995	1680
Hoste børn				63	280	343	340
Kronisk bronkitis voksne				528	2360	2890	2890
Kronisk bronkitis børn				1950	12900	14900	14900
Tabte arbejdsdage				49300	222000	271000	271000
Dage med restriktioner i aktivitet				649000	2910000	3560000	3560000
Dage med mindre restriktioner i aktivitet		1082		0	0	0	1080
Lungekræft				10	44	54	54
Spædbarnsdød				0	1	1	1

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 2020 opdelt på SNAP kategorier.

Danske kilder bidrager med i alt omkring 860 for tidlige dødsfald, hvoraf ikke-industriel forbrænding bidrager med ca. 280 for tidlige dødsfald, landbrug med ca. 195 for tidlige dødsfald og vejtrafik med ca. 175 for tidlige dødsfald, heraf ca. ¾-dele fra udstødning og ca. ¼-del fra ikke-udstødning. For hospitalsindlæggelser pga. åndedrætsbesvær er det vejtransport fra udstød-

ning i Danmark, der er den største bidragsyder, mens for hospitalsindlæggelser for hjertekarsygdomme er det ikke-industriel forbrænding fra husholdninger i Danmark, der er den største bidragsyder. Danske kilder giver desuden anledning til over 688.000 sygedage (dage med restriktioner i aktiviteter).

Udenlandske kilder bidrager med i alt ca. 3.170 for tidlige dødsfald, hvoraf naturlige kilder og international skibsfart bidrager med henholdsvis omkring 1.140 og 555 for tidlige dødsfald. Landbrugssektoren i Europa (uden for Danmark) bidrager med omkring 530 for tidlige dødsfald i Danmark og vejtrafik bidrager med omkring 365, energiindustrien med ca. 211, ikke-industriel forbrænding med ca. 241, og fremstillingsvirksomhed og byggeri med ca. 245 for tidlige dødsfald i Danmark. Ikke-vejgående transport 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 10% til 20% ses, afhængigt af helbredseffekt.

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

Ikke-industriel forbrænding fra husholdninger i Danmark bidrager mest til antallet af for tidlige dødsfald (ca. 5,7% ud af det samlede antal fra alle kilder), efterfulgt af landbrug (ca. 4,4%) og vejtransport (ca. 4%). 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. tre gange større end ikke-udstødningsdelen. Væsentlige bidragsydere er desuden ikke-vejgående transport med ca. 1,5% og kraftværker med ca. 1,3%. For dage med mindre restriktioner i aktivitet, er det vejtransport, der bidrager mest (-4,6%) dernæst ikke-vejgående transport (-1,9%) og kraftværker (-0,9%). Det bemærkes, at tallene er negative, hvilket vil sige, at disse sektorer bidrager til at mindske antallet af dage med mindre restriktioner i aktivitet. Dette skyldes, at denne effekt udelukkende er koblet til eksponering for ozon, og i dette tilfælde er det sektorer med relativt store udledninger af kvælstofoxider, der har indflydelse. De negative tal skyldes ikke-lineær kemi med betydning for dannelsen af ozon, hvor nogle udledninger bidrager til at mindske koncentrationen af ozon lokalt.

Der ses desuden et bidrag på ca. 10,8% fra vejtransport (udstødning) til hospitalsindlæggelser pga. åndedrætsbesvær. Denne sektor bidrager negativt til hospitalsindlæggelser som følge af hjertekarsygdomme, som er baseret på eksponering af både $PM_{2.5}$ og ozon. Hvis udledningen af kvælstofoxider er tilstrækkeligt stor, vil påvirkningen af ozon også påvirke dannelsen af hydroxylradikaler i atmosfæren, som igen har stor indflydelse på en række reaktionshastigheder for andre kemiske reaktioner i atmosfæren, herunder dannelsen af de sekundære uorganiske partikler, ammoniumsulfat og -nitrat, som bidrager væsentligt til den samlede koncentration af $PM_{2.5}$. Dannelsen af de sekundære partikler er således også påvirket af ikke-lineær atmosfærekemi.

Tabel 12.5. Danske og udenlandske kilders bidrag til helbredseffekter i Danmark i 2020 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 kort-tidseksponering (PM _{2,5} , NO ₂ , O ₃)	For tidlige dødsfald fra lang-tidseksponering (PM _{2,5} , NO ₂)	Total antal for tidlige dødsfald (PM _{2,5} , SO ₂ , NO ₂ , O ₃)	Hospitalindlæggelser, ånderåtsbesvær (PM _{2,5} , NO ₂ , O ₃)	Hospitalindlæggelser, hjertekarsygdomme (PM _{2,5} , O ₃)	Hoste børn (PM _{2,5})	Kronisk bronkitis voksne (PM _{2,5})	Kronisk bronkitis børn (PM _{2,5})	Tabte arbejdsdage (PM _{2,5})	Dage med restriktioner i aktivitet (PM _{2,5})	Dage med mindre restriktioner i aktivitet (O ₃)	Lungekræft (PM _{2,5})	Dødsfald blandt spædbørn (PM _{2,5})
Danske kilder														
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	34	24	58	109	1	2	19	68	1780	23500	-12	0,3	0,0
201	Ikke-industriel forbrænding	2	4	6	9	1	0	4	14	357	4810	0,0	0,0	0,0
202	Handel og service													
202	Ikke-industriel forbrænding	48	203	251	133	68	24	202	750	18900	249000	-4,0	3,7	0,1
203	Husholdninger													
203	Ikke-industriel forbrænding	4	18	23	12	6	2	18	66	1680	21900	0,7	0,3	0,0
	Land-, skovbrug og akvakultur													
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	14	12	26	39	2	1	11	39	1040	14000	-2,7	0,3	0,0
4	Industrielle processer	5	18	23	9	7	2	18	63	1670	22200	2,7	0,3	0,0
5	Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	1	5	6	2	2	0	4	15	419	5460	1,7	0,3	0,0
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	4	15	18	8	7	2	15	54	1340	18500	4,7	0,3	0,0
701-706	Vejtransport Udstødning	80	47	127	330	-10	5	47	163	4330	57500	-59	1,0	0,0
707-708	Vejtransport Ikke-udstødning	8	40	48	20	15	5	41	149	4000	49900	1,3	0,7	0,0
8	Andre mobile kilder	36	30	67	143	0	3	30	107	2790	36900	-24	0,7	0,0
9	Affald	4	13	16	8	5	1	12	43	1130	15200	1,0	0,3	0,0
10	Landbrug	56	139	195	189	30	16	137	439	12900	169000	0,7	2,7	0,0
Europæiske og udenlandske kilder														
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	43	167	211	110	49	20	166	544	15600	205000	18	3,0	0,0
2	Ikke-industriel forbrænding	47	194	241	117	66	23	192	670	18100	237000	33	3,7	0,1
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	53	192	245	131	63	22	191	621	18000	235000	49	3,3	0,1
4	Industrielle processer	11	41	51	21	26	5	41	148	3820	50000	33	0,7	0,0
5	Udvinning, behandling, lagring og transport af brændsler	6	15	22	10	18	2	15	50	1440	18800	34	0,3	0,0
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	9	15	23	11	31	2	15	51	1370	17900	72	0,3	0,0
7	Vejtransport	86	279	365	234	96	33	277	933	26100	341000	144	5,0	0,1
8	Andre mobile kilder	26	85	111	71	31	10	85	289	8000	104000	44	1,7	0,0
9	Affald	4	18	22	9	8	2	18	62	1660	21700	8,0	0,3	0,0
10	Landbrug	108	424	533	243	100	50	422	1330	39600	519000	91	7,7	0,1
-	International skibstransport	150	406	555	536	69	47	402	1360	37800	494000	12	7,3	0,1
-	Naturlige kilder	339	799	1139	556	562	94	793	7690	74600	976000	850	14,7	0,2
	Sum alle kilder	1180	3210	4390	3060	1260	373	3180	15700	299000	3920000	1300	59	1,1
	Total luftforurening	1120	2900	4020	2960	1130	342	2880	14800	271000	3550000	1090	53	1,0
	Difference i % mellem sum af sektorer og total luftforurening	6	11	9	4	11	9	10	6	10	10	20	10	12

Tabel 12.6. Danske og udenlandske kilders bidrag til helbredseffekter i Danmark i 2020 fordelt på udledningssektorer i %.

SNAP	Emissionssektor	For tidlige dødsfald fra korttidseksp sponering (PM _{2,5} , SO ₂ , NO ₂ , O ₃)	For tidlige dødsfald fra langtidsek sponering (PM _{2,5} , NO ₂)	Total antal for tidlige dødsfald (PM _{2,5} , SO ₂ , NO ₂ , O ₃)	Hospitalsindlæggelser, åndedræts- besvær (PM _{2,5} , NO ₂ , O ₃)	Hospitalsindlæggelser, hjertekar- 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 raffinade- rier	2,9	0,7	1,3	3,5	0,1	0,5	0,6	0,4	0,6	0,6	-0,9	0,6	0,0
201	Ikke-industriel forbræn- ding	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
202	Handel og service Ikke-industriel forbræn- ding	4,1	6,3	5,7	4,3	5,4	6,4	6,4	4,8	6,3	6,4	-0,3	6,2	9,4
203	Husholdninger Ikke-industriel forbræn- ding	0,4	0,6	0,5	0,4	0,5	0,5	0,6	0,4	0,6	0,6	0,1	0,6	0,0
3	Land-, skovbrug og akva- kultur	1,2	0,4	0,6	1,3	0,2	0,4	0,4	0,2	0,3	0,4	-0,2	0,6	0,0
4	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	0,5	0,6	0,5	0,3	0,6	0,5	0,6	0,4	0,6	0,6	0,2	0,6	3,1
5	Industrielle processer	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	0,0
6	Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	0,3	0,5	0,4	0,3	0,6	0,4	0,5	0,3	0,4	0,5	0,4	0,6	3,1
701- 706	Anvendelse af opløs- nings- midler og produkter	6,7	1,5	2,9	10,8	-0,8	1,4	1,5	1,0	1,4	1,5	-4,6	1,7	3,1
707- 708	Vejtransport Udstødning	0,7	1,2	1,1	0,7	1,2	1,3	1,3	0,9	1,2	1,3	0,1	1,1	3,1
8	Vejtransport Ikke-udstød- ning	3,0	0,9	1,5	4,7	0,0	0,9	1,0	0,7	0,9	0,9	-1,9	1,1	3,1
9	Andre mobile kilder	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,1	0,6	0,0
10	Affald	4,7	4,3	4,4	6,2	2,4	4,4	4,3	2,8	4,3	4,3	0,1	4,5	3,1
Europæiske og uden- landske kilder														
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	3,7	5,2	4,8	3,6	3,9	5,3	5,2	3,5	5,2	5,2	1,4	5,1	3,1
2	Ikke-industriel forbræn- ding	4,0	6,0	5,5	3,8	5,3	6,1	6,0	4,3	6,1	6,0	2,5	6,2	6,3
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	4,5	6,0	5,6	4,3	5,0	6,0	6,0	3,9	6,0	6,0	3,8	5,6	6,3
4	Industrielle processer	0,9	1,3	1,2	0,7	2,1	1,2	1,3	0,9	1,3	1,3	2,6	1,1	3,1
5	Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	0,5	0,5	0,5	0,3	1,4	0,4	0,5	0,3	0,5	0,5	2,6	0,6	0,0
6	Anvendelse af opløs- ningsmidler og produkter	0,7	0,5	0,5	0,4	2,5	0,4	0,5	0,3	0,5	0,5	5,5	0,6	0,0
7	Vejtransport	7,3	8,7	8,3	7,6	7,6	8,7	8,7	5,9	8,7	8,7	11,0	8,5	6,3
8	Andre mobile kilder	2,2	2,7	2,5	2,3	2,5	2,7	2,7	1,8	2,7	2,7	3,4	2,8	3,1
9	Affald	0,4	0,6	0,5	0,3	0,6	0,5	0,6	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,0
10	Landbrug	9,2	13,2	12,1	7,9	7,9	13,3	13,2	8,5	13,3	13,2	7,0	13,0	9,4
-	International skibstrans- port	12,7	12,6	12,6	17,5	5,5	12,6	12,6	8,7	12,6	12,6	0,9	12,4	12,5
-	Naturlige kilder	28,7	24,9	25,9	18,1	44,8	25,2	24,9	48,8	25,0	24,9	65,3	24,9	21,9
Sum alle kilder		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

I Tabel 12.6 er desuden angivet de procentvise bidrag fra de forskellige udledningssektorer i udlandet til helbredseffekter i Danmark. Naturlige kilder i udlandet bidrager mest til helbredseffekter i Danmark sammenlignet med de øvrige udledningssektorer. Naturlige kilder bidrager f.eks. med omkring 18% til hospitalsindlæggelser grundet åndedrætsbesvær og med omkring 65% til dage med mindre restriktioner i aktivitet. Sidstnævnte er kun relateret til ozon, hvor der er et relativt stort bidrag fra naturlige kilder. Følgende naturlige kilder er inkluderet i modellen:

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

International skibstrafik bidrager med omkring 12,6% til antallet af for tidlige dødsfald og naturlige kilder med omkring 26%. Landbrug i udlandet bidrager med ca. 12% til antallet af for tidlige dødsfald i Danmark og vejtransport ligger på omkring 8% i bidrag til helbredseffekter i Danmark. Endelig er bidraget fra kraftværker, boligopvarmning og fremstillingsprocesser nogenlunde lige stort og i størrelsesordenen 5-6%.

12.4 Danske og udenlandske kilder til de eksterne omkostninger af luftforureningen i Danmark 2020

Kilderne til de eksterne omkostninger fra luftforureningen i Danmark er beregnet for 2020 ved hjælp af EVA5.2. Der er også her anvendt samme modelopsætning og økonomisk værdisætning, som i forbindelse med NOVANA rapporteringen for 2019 (Ellermann et al., 2021; Andersen et al., 2019). Beregningerne med EVA5.2 modelsystemet er gennemført, så det er muligt at adskille eksterne omkostninger fra danske hhv. europæiske kilder.

Tabel 12.7 viser de samlede eksterne omkostninger fordelt på de forskellige luftforureningskomponenter, som giver anledning til helbredseffekter i Danmark i 2020. Det ses, at de samlede omkostninger, som følge af luftforureningen i Danmark fra såvel udenlandske som danske kilder, er på omkring 76 milliarder kr. i 2020, hvilket er lidt under gennemsnittet for perioden 2018-2020. For tidlige dødsfald som følge af korttids- og langtidseksponering tegner sig for den største del af omkostningen, omkring 70 milliarder kr. Sygedage (dage med restriktioner i aktivitet) tegner sig for ca. 3,9 milliarder kr. og kronisk bronkitis (børn) for ca. 856 mio. kr.

Tabel 12.7. De samlede eksterne omkostninger i 2020 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.).

Eksterne omkostninger							
Helbredseffekt	SO ₂	O ₃	NO ₂	PPM _{2,5}	Øvrig PM _{2,5}	PM _{2,5}	Total
For tidlig død (korttidseksposering)	181	2920	10400	3300	18800	22100	35500
For tidlig død (langtidseksposering)			3	6230	28100	34300	34300
For tidlig død (total)	181	2920	10400	9530	46900	56400	69900
Hospitalsindlæggelser, åndedrætsbesvær		9	106	19	86	105	221
Hospitalsindlæggelser, hjertekarsygdomme		49		22	97	119	167
Hoste børn				1	3	3	3
Kronisk bronkitis børn				155	701	856	856
Tabte arbejdsdage				100	452	552	552
Dage med restriktioner i aktivitet				716	3210	3920	3920
Dage med mindre restriktioner i aktivitet		1		0	0	0	1
Lungekræft				5	24	29	29
Spædbarnsdød				9	37	45	45
Total	181	2980	11500	10560	51500	62000	75700

Bidrag fra danske og udenlandske kilder til eksterne omkostninger i Danmark

Tabel 12.8 viser fordelingen af bidraget til eksterne omkostninger i Danmark (i mio. kr.) opgjort fra kilder i udlandet og Danmark, mens tabel 12.9 giver bidragene i %. Det samlede bidrag til de eksterne omkostninger i Danmark fra danske kilder er ca. 17 mia. kr. Heraf bidrager Ikke-industriel forbrænding med ca. 4,8 mia. kr., Vejtransport med ca. 4 mia. kr. og Landbrug med ca. 3,7 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, primært udledte partikler og øvrige partikler fra danske kilder er ca. lige store (5,6-5,8 mia. kr.), mens danske kilder bidrager til færre helbredsrelaterede eksterne omkostninger fra ozon, pga. udledninger af kvælstofoxider. De helbredsrelaterede eksterne omkostninger fra udledninger af svovldioxid fra danske kilder er beregnet til knapt 172 mio. kr.

Det er specielt energiproduktion, fremstillingsvirksomhed, industrielle processer og affaldshåndtering, der bidrager til eksterne omkostninger i Danmark fra danske kilder for svovldioxid. For ozon, er det specielt vejtransport, ikke-vejgående transport og energisektoren, der bidrager, men negativt, sådan at kilderne (ved udledning af kvælstofoxider) bidrager til at mindske ozon koncentrationerne. De samme sektorer er væsentlige bidragsydere til kvælstofdioxid. Udslip af kvælstofoxider bidrager til eksterne omkostninger forbundet med kvælstofdioxid og med en gevinst mht. ozon. Gevinsten fra reduceret ozon (samlet -246 mio. kr fra alle danske kilder) opvejer dog langt fra omkostningerne fra kvælstofdioxid (samlet 5,9 milliarder kr. fra alle danske kilder).

Tabel 12.8. De samlede eksterne omkostninger i 2020 som følge af luftforureningen i Danmark fra danske og udenlandske kilder, fordelt på sektorer og udvalgte undersektorer i mio. kr. 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}), samt total. Summen af alle kilder er givet sammen med omkostningerne fra den totale luftforurening. Differencen i % skyldes ikke-lineære atmosfærekemiske processer.

SNAP	Emissionssektor	SO ₂	O ₃	NO ₂	PPM _{2,5}	Øvrig PM _{2,5}	PM _{2,5}	Total
Danske kilder								
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	41	-33	1010	156	232	388	1410
201	Ikke-industriel forbrænding	1	0	54	49	29	78	133
	<i>Handel og service</i>							
202	Ikke-industriel forbrænding	9	-11	231	2920	1160	4080	4310
	<i>Husholdninger</i>							
203	Ikke-industriel forbrænding	3	2	24	251	110	361	390
	<i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>							
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	40	-8	352	84	146	230	614
4	Industrielle processer	42	8	1	165	202	367	419
5	Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	3	5	0	12	81	94	101
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	1	13	4	206	92	298	316
701-706	Vejtransport <i>Udstødning</i>	2	-163	2400	249	698	947	3190
707-708	Vejtransport <i>Ikke-udstødning</i>	0	4	1	577	233	810	814
8	Andre mobile kilder	6	-67	1020	272	334	606	1570
9	Affald	23	3	13	133	117	250	289
10	Landbrug	0	2	757	521	2400	2920	3680
Europæiske og udenlandske kilder								
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	10	50	126	123	3370	3493	3680
2	Ikke-industriel forbrænding	4	91	103	1540	2420	3960	4150
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	12	135	156	1	4010	4010	4320
4	Industrielle processer	0	92	-14	548	275	824	901
5	Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	1	94	-7	33	292	325	412
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	0	198	-22	113	195	308	484
7	Vejtransport	1	396	432	420	5310	5740	6560
8	Andre mobile kilder	0	122	127	230	1520	1750	2000
9	Affald	0	22	-1	159	203	362	383
10	Landbrug	-2	250	127	229	8660	8890	9270
-	International skibstransport	16	34	2010	732	7540	8270	10300
-	Naturlige kilder	-1	2340	435	326	18700	19000	21800
Sum alle kilder		212	3580	9350	10100	58400	68500	81600
Total luftforurening		212	2990	10300	10400	51400	61900	75700
Difference i % mellem sum af sektorer og total luftforurening		0	20	-9	-4	14	11	8

Europæiske landbaserede kilder bidrager til de eksterne omkostninger med sammenlagt ca. 1,5 milliarder kr. mht. ozon, mens naturlige kilder fra hele den nordlige hemisfære dominerer med et bidrag på ca. 2,3 milliarder kr. Her til skal nævnes, at ozon kan have en relativt lang levetid i atmosfæren (op til to uger), og ozon skal således ses i en global sammenhæng, hvor kilder i f.eks. Sydøstasien kan være en væsentlig bidragsyder (bidrag fra den sydlige hemisfære er ikke medtaget her, men vurderes at være minimal). 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 3,5 milliarder kr., hvor den største enkelte bidragyder er international skibstrafik med ca. 2 milliarder kr. Bidraget fra de primært udledte partikler fra udlandet er samlet omkring 4,5 milliarder kr., hvor de største kilder er Ikke-industriel forbrænding med omkring 1,5 milliarder kr., International skibstrafik med ca. 730 millioner kr. og Industrielle processer med omkring 550 millioner 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. 8,7 milliarder kr. til de eksterne omkostninger i Danmark og international skibstrafik med omkring 7,5 milliarder 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 eksterne omkostninger i Danmark ca. 32,2 milliarder kr., med størst bidrag fra Landbrug (ca. 9,3 milliarder kr.), Vejtransport (med ca. 6,6 milliarder kr.) og Energisektoren, Ikke-industriel forbrænding og Fremstillingsvirksomhed og byggeri, alle tre sektorer med omkring 4 milliarder kr. Derudover bidrager International skibstrafik med omkring 10,3 milliarder kr. og de naturlige kilder med ca. 21,8 milliarder kr.

Summen af de eksterne omkostninger for de forskellige stoffer, der bidrager til helbredseffekter, både danske og udenlandske, er angivet i tabel 12.8, ligesom de totale eksterne omkostninger, som skyldes den totale luftforurening fra alle kilder samlet. De to tal giver ikke nødvendigvis det samme pga. ikke-lineære atmosfærekemiske processer. En forskel fra -9% - 20% ses, afhængigt af kemisk stof. Der ses også en mindre forskel på -4% for de primære partikler (PPM_{2,5}), som skyldes det såkaldte Gibb's fænomen (numeriske oscillationer i Eulerske modeller pga. stærke gradienter).

Tabel 12.9 viser fordelingen af bidraget til de totale eksterne omkostninger i Danmark fra udenlandske og danske kilder opgjort på sektorer i %. For svovldioxid er det specielt Energiindustrien, Fremstillingsvirksomhed og byggeri, samt Industrielle processer i Danmark, der bidrager med omkring 20% hver. Svovldioxid i sig selv er dog den mindste bidragsyder til de samlede eksterne omkostninger, da udledninger af svovldioxid er reduceret betragteligt i de seneste årtier. Vejtransport og Ikke-vejgående transport, samt Energiindustrien er de væsentligste bidragsydere til de eksterne omkostninger 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. 29% og 8%. For Vejtransporten er bidraget fra udledningerne, der ikke er relateret direkte til udstødning (dæk-, bremse-, og vejslid) mere end dobbelt så stort, som bidraget fra udstødning. Indenfor øvrig PM_{2,5} bidrager Landbrug med omkring 4,1%, Ikke-industriel forbrænding med ca. 2,2% og Vejtransport med ca. 1,6%. Lægges bidraget fra de forskellige kemiske stoffer sammen (i total), ses det, at Ikke-industriel forbrænding i Danmark bidrager samlet med omkring 6%, Vejtransport med ca. 4,9% og Landbrug med ca. 4,5% ud af de totale eksterne omkostninger.

Tabel 12.9. De samlede eksterne omkostninger i 2020 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	19,6	-0,9	10,8	1,6	0,4	0,6	1,7
201	Ikke-industriel forbrænding <i>Handel og service</i>	0,5	0,0	0,6	0,5	0,0	0,1	0,2
202	Ikke-industriel forbrænding <i>Husholdninger</i>	4,5	-0,3	2,5	29,0	2,0	6,0	5,3
203	Ikke-industriel forbrænding <i>Land-, skovbrug og akvakultur</i>	1,3	0,1	0,3	2,5	0,2	0,5	0,5
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	18,7	-0,2	3,8	0,8	0,2	0,3	0,8
4	Industrielle processer	20,0	0,2	0,0	1,6	0,3	0,5	0,5
5	Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	1,3	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	0,4	0,4	0,0	2,1	0,2	0,4	0,4
701-706	Vejtransport <i>Udstødning</i>	0,7	-4,6	25,7	2,5	1,2	1,4	3,9
707-708	Vejtransport <i>Ikke-udstødning</i>	0,0	0,1	0,0	5,7	0,4	1,2	1,0
8	Andre mobile kilder	3,0	-1,9	10,9	2,7	0,6	0,9	1,9
9	Affald	11,0	0,1	0,1	1,3	0,2	0,4	0,4
10	Landbrug	-0,1	0,0	8,1	5,2	4,1	4,3	4,5
Europæiske og udenlandske kilder								
1	Energiindustri, f.eks. kraftværker og raffinaderier	4,9	1,4	1,4	1,2	5,8	5,1	4,5
2	Ikke-industriel forbrænding	1,9	2,5	1,1	15,3	4,1	5,8	5,1
3	Fremstillingsvirksomhed og byggeri	5,7	3,8	1,7	0,0	6,9	5,9	5,3
4	Industrielle processer	-0,1	2,6	-0,2	5,5	0,5	1,2	1,1
5	Udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler	0,3	2,6	-0,1	0,3	0,5	0,5	0,5
6	Anvendelse af opløsningsmidler og produkter	0,0	5,5	-0,2	1,1	0,3	0,4	0,6
7	Vejtransport	0,3	11,0	4,6	4,2	9,1	8,4	8,0
8	Andre mobile kilder	0,1	3,4	1,4	2,3	2,6	2,6	2,4
9	Affald	0,0	0,6	0,0	1,6	0,3	0,5	0,5
10	Landbrug	-1,2	7,0	1,4	2,3	14,8	13,0	11,4
-	International skibstransport	7,5	0,9	21,5	7,3	12,9	12,1	12,7
-	Naturlige kilder	-0,3	65,3	4,6	3,2	31,9	27,7	26,7
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. 15%, International skibstrafik med ca. 7%, Industrielle processer med ca. 5,5% og Vejtransport med ca. 4%. For øvrig PM_{2,5} er det naturlige kilder (herunder havsalt, skovbrande, sekundære uorganiske partikler fra naturlige kilder af kvælstofoxider og sekundære organiske partikler, der dannes fra udledninger af flygtige organiske forbindelser fra vegetation), der er dominerende med ca. 32%. Dernæst kommer Land-

brug med ca. 15% (som skyldes ammoniakudledninger), International skibstransport med ca. 13% og Vejtransport med ca. 9%. Forbrænding af fossile brændstoffer i Energisektoren og Fremstillingssektoren, samt Ikke-industriel 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. 11% og 13% og Vejtransport med ca. 8%.

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 kvælstofdioxid for udenlandske kilder (sektor 4, 5 og 6). Dette skyldes også ikke-lineær atmosfærisk kemi. Disse sektorer er kendetegnet ved relativt store udledninger af flygtige organiske forbindelser i forhold til kvælstofoxider.

12.5 Usikkerhed og perspektiver for de fremtidige beregninger

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

En væsentlig del af usikkerhederne relaterer sig til de eksponerings-responsfunktioner, som anvendes. Dette gælder specielt for kvælstofdioxid. For mortalitet fra langtidseksponering relateret til kvælstofdioxid anbefaler WHO en tærskelværdi, så det kun er koncentrationer af kvælstofdioxid over $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, der medtages ved beregning af helbredseffekterne (WHO, 2013). Denne tærskelværdi er derfor implementeret i DCE's beregninger, hvor koncentrationerne af kvælstofdioxid beregnes med UBM-modellen med en geografisk opløsning på $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$. Der er dog væsentlig usikkerhed forbundet med denne tærskelværdi på de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, hvor der blandt danske helbredsforskere er draget tvivl om den bagvedliggende dokumentation for tærskelværdien, som måske skal være mindre eller endog helt fjernes. Dette vil have stor indflydelse på beregningen af antallet af for tidlige dødsfald henført til kvælstofdioxid for Danmark. Antallet af tilfælde af for tidlige dødsfald relateret til kvælstofdioxid vil blive væsentligt større, hvis en mindre tærskelværdi benyttes. Vi har dog på nuværende tidspunkt ikke tilstrækkeligt vidensgrundlag til at fjerne denne tærskelværdi for kvælstofdioxid.

Ligeledes skal det bemærkes, at ifølge WHO-rapporten (WHO, 2013) kan man vælge at basere beregningen af helbredseffekter fra ozon på en anden parameter end den, som anvendes i dag. Helbredseffekter fra ozon kommer primært fra eksponering for høje koncentrationer, så derfor benyttes i dag en parameter (SOMO35), hvor det kun er ozonkoncentrationer over 35 ppb ($=70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) som summeres. De nye anbefalinger fra WHO (WHO, 2021a), indikerer imidlertid, at det kunne være mere korrekt at summere ozonkoncentrationer over 30 ppb ($=60 \mu\text{g}/\text{m}^3$; SOMO30). Hvis den lavere tærskel benyttes (SOMO30), vil det ligeledes føre til et større antal beregnede for tidlige dødsfald. For ozon har vi valgt at basere resultaterne på SOMO35, indtil en opdatering af EVA modelsystemet finder sted.

Derudover er der nye videnskabelige danske studier (Hvidtfeldt et al., 2019; So et al., 2020; Raaschou-Nielsen et al., 2020), der indikerer, at den relative risiko (RR) for dødelighed relateret til lave $\text{PM}_{2,5}$ er højere end den, som er

anbefalet af WHO (6,2% per 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; WHO, 2013). Yderligere indikerer disse nye studier, at sammenhængen mellem $\text{PM}_{2,5}$ koncentrationer og mortalitet er ikke-lineær, sådan at den relative risiko er højere for de lave koncentrationer, som er almindelige i Danmark (mindre end 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), og tilsvarende er den relative risiko lavere for højere koncentrationer. Benyttes en større relativ risiko for mortalitet relateret til $\text{PM}_{2,5}$, vil dette også føre til et større antal for tidlige dødsfald. Den 22/9-2021 udkom WHO med nye retningslinjer til beregning af dødelighed relateret til luftforurening, hvor den relative risiko nu er vurderet til at være 8% mod de nuværende 6,2% per 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for $\text{PM}_{2,5}$ (WHO, 2021a). Desuden er der nye retningslinjer for NO_2 og O_3 . Det har ikke været muligt at implementere disse nye retningslinjer i de nuværende beregninger. De nye retningslinjer vil med stor sandsynlighed øge antallet af beregnede for tidlige dødsfald.

Der mangler endvidere fortsat viden om, hvilke dele af partikelforureningen, som giver årsag til helbredseffekterne. Der anvendes den samme eksponerings-responsfunktion for alle de kemiske $\text{PM}_{2,5}$ -komponenter, da det på nuværende tidspunkt er bedste viden. Ny viden på dette område vil potentielt set ændre på de estimerede helbredseffekter relateret til de forskellige kemiske stoffer og udledningssektorer, mens det ikke nødvendigvis vil påvirke det totale antal tilfælde.

Der er usikkerhed forbundet med opgørelsen af hvilke kilder, der bidrager til helbredseffekterne, da denne afhænger af, hvilken procentsats udledningerne bliver reduceret med. Dette skyldes ikke-lineær 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 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. Variationen på bidragene fra hver sektor i kildeopgørelsen for Danmark kan være op til 20% fra danske udledninger og op til 50% for de udenlandske kilder, afhængigt af kemisk stof. Dette gælder ikke for de primære partikler ($\text{PPM}_{2,5}$ og havsalt), som er lineære, da de ikke indgår i atmosfærekemiske reaktioner.

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

13. Luftkvalitet og WHO's nye anbefalinger

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

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

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

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

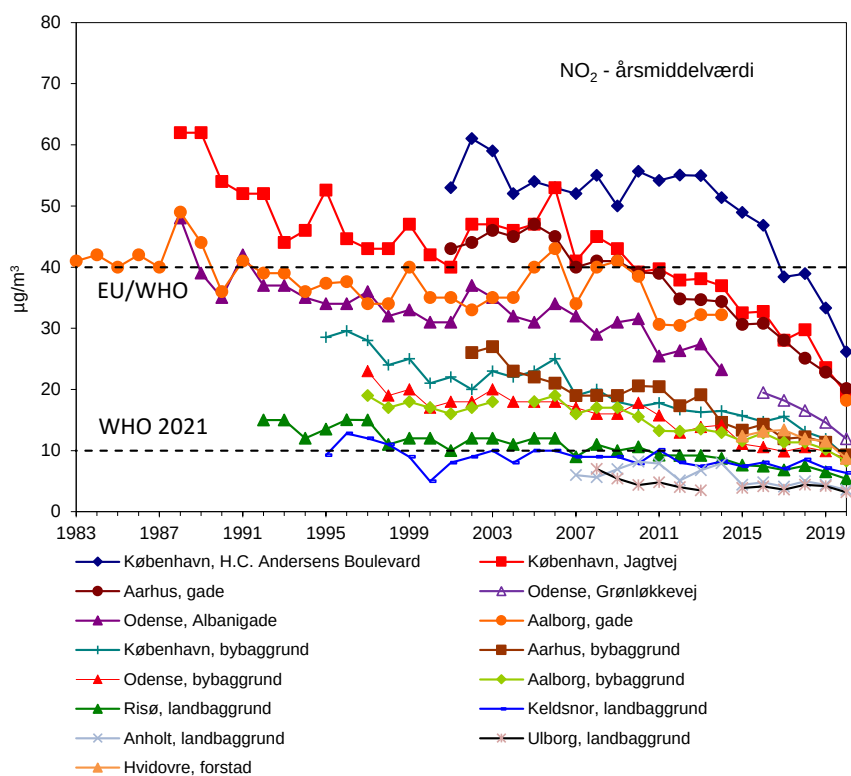
13.1 Kvælstofdioxid

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

Retningslinjen for den maksimale timemiddelkoncentration forblev uændret, og her ligger koncentrationerne under ved alle målestationer. WHO har indført en ny korttidsgrænse for 99%-fraktilen af døgnmiddelværdierne i et kalenderår (svarer omtrent til den 4. højeste døgnmiddelværdi). For denne retningslinje måles ingen overskridelse i by- og landbaggrund, mens der er overskridelse på 2-20% for fire af gademålestationer. 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	25
<i>Gade</i>			
København, H.C. Andersens Boulevard	26	113	51
København, Jagtvej	19	90	46
Odense, Grønløkkevej	12	84	30
Aarhus, Banegaardsgade	20	133	50
Aalborg, Vesterbro	18	120	54
<i>Bybaggrund</i>			
København	9	67	23
Odense	8,8	67	23
Aarhus	9,3	81	27
Aalborg	8,3	66	22
<i>Forstad</i>			
Hvidovre	8,7	77	22
<i>Landbaggrund</i>			
Anholt	3,6	62	13
Keldsnor	6,3	82	20
Risø	5,4	49	16
Ulborg	3,2	30	11



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	5362	2004	431
Odense, Grønløkkevej	2721	860	342
Aarhus, Banegaardsgade	2074	603	406
Aalborg, Vesterbro	882	710	406
<i>Bybaggrund</i>			
København	548	446	289
<i>Landbaggrund</i>			
Risø	706	526	330

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 grænse, så derfor er der slet ingen problemer med overholdelse af den nye retningslinje.

WHO har endvidere opretholdt en retningslinje for 10-minutters-middelværdi af svovldioxid ($500 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
WHO 2006	20
WHO 2021	40
<i>Gade</i>	
København, H.C.Andersens Boulevard	4,1
Aalborg, Vesterbro	4,4

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 konsekutive måneder i et kalenderår, hvor der måles de højeste værdier (WHO, 2021a). Ud fra målingerne på målestationerne er det fastlagt, at gennemsnittet i Danmark skal beregnes fra marts til og med august. Tabel 13.4 viser resultaterne for ozon peak season for de danske målestationer. For by- og landbaggrund ligger ozon peak season fra 25% til 40% over den anbefalede grænse, mens niveauet ligger noget under ved gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard. Her ligger niveauet omkring 15% over retningslinjen. Det lavere niveau skyldes den lokale nedbrydning af ozon grundet udledning af kvælstofoxider fra vejtrafikken.

WHO her endvidere opretholdt den gamle retningslinje for korttidseksponering for ozon baseret på 99%-fraktilen af 8-timersmiddelkoncentrationerne i et kalenderår. By- og landbaggrund ligger fra 12% til 25% over denne retningslinje, mens ozonkoncentrationerne ved gademålestationen ved H.C. Andersens Boulevard kun ligger 3% over retningslinjen (Tabel 13.4).

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

	Ozon Peak season* $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Maksimal 8-timers Middelværdi 99%-fraktil $\mu\text{g}/\text{m}^3$
WHO 2006		100
WHO 2021	60	100
<i>Gade</i>		
København, H.C.Andersens Boulevard	69	103
<i>Bybaggrund</i>		
København	83	123
Odense	84	125
Aarhus	77	116
Aalborg	77	114
<i>Landbaggrund</i>		
Keldsnor	80	120
Risø	84	123
Ulborg	78	112

* Ozon peak season angiver gennemsnit for den maksimale daglige løbende 8-timersmiddelværdi beregnet for de seks konsekutive 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 koncentrationniveauer. 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. Årsmiddeldkoncentrationerne for PM_{2.5} lå i 2020 under den gamle retningslinje på 10 µg/m³ ved alle målestationer i by- og landbaggrund og for hovedparten af gademålestationerne. Kun ved H.C. Andersens Boulevard var der tale om en overskridelse (5%). Koncentrationerne ved gademålestationerne ligger omtrent dobbelt så højt som 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.

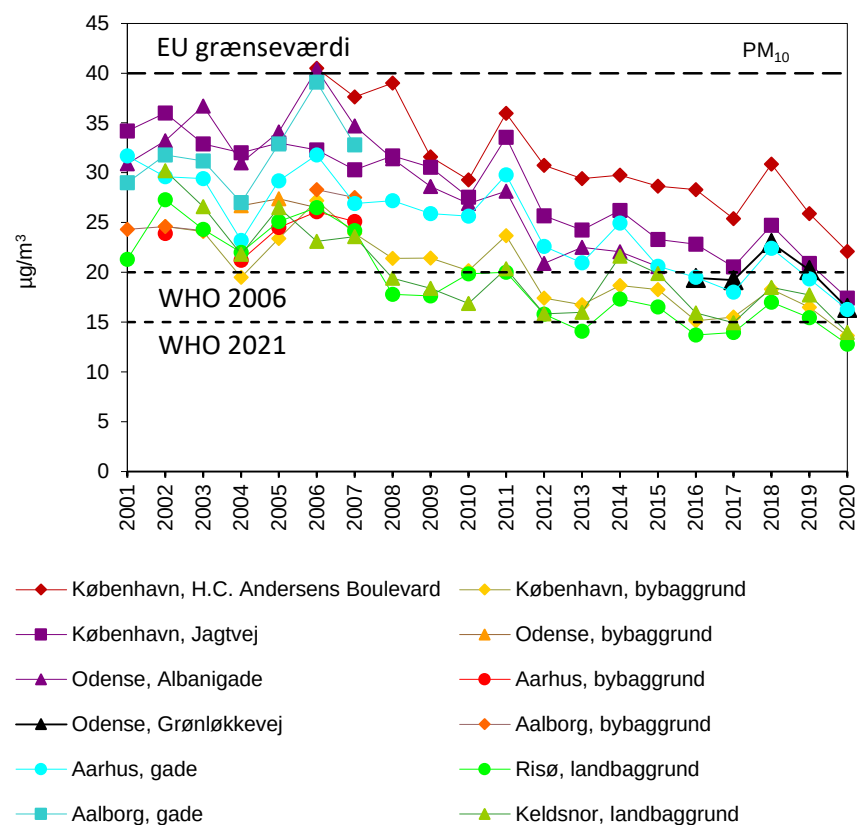
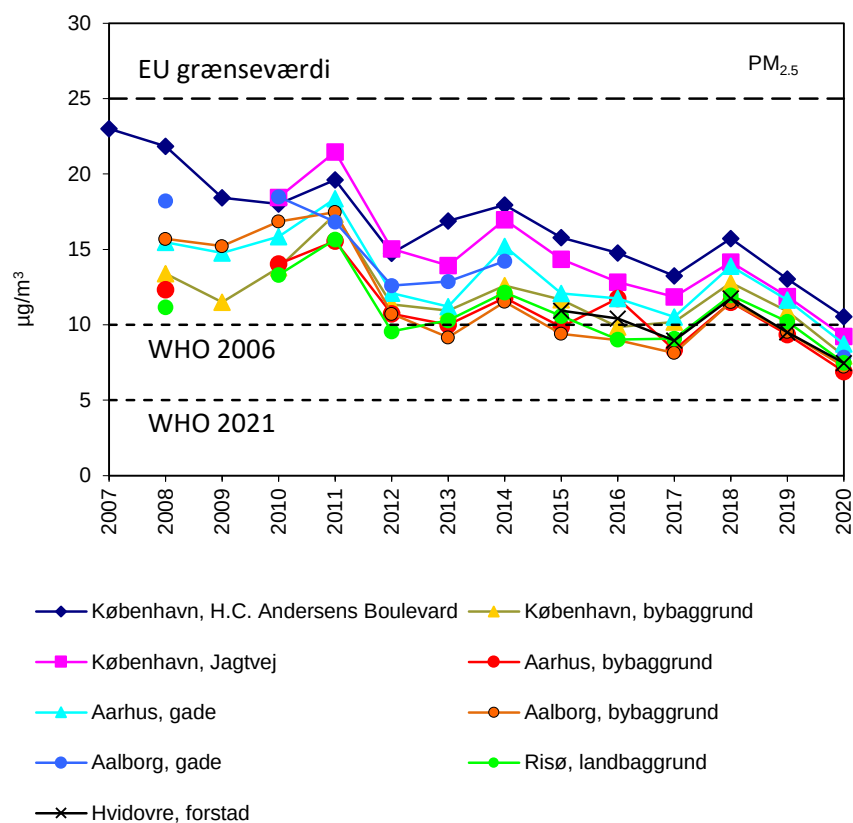
Figur 13.2 viser udviklingstendenserne for årsmiddelværdierne af PM_{2.5} og PM₁₀ sammenholdt med EU-grænseværdi og den gamle og nye retningslinje fra WHO. Figurene viser, at koncentrationniveauerne for PM₁₀ ligger tættere på den nye retningslinje end for PM_{2.5}.

Retningslinjen for korttidseksponering for PM_{2.5} baseret på 99%-fraktilen af døgnmiddelværdierne var tæt på at blive overholdt 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 (60-85%). 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 er PM_{2.5}, der skal reduceres for at kunne komme til at overholde de nye retningslinjer fra WHO, og at man stort set vil komme i mål med PM₁₀, hvis blot man sørger for overholdelse af retningslinjen for PM_{2.5}. Dette hænger sammen med at PM_{2.5} indgår som en delmængde af PM₁₀, så hvis man opnår for eksempel en 6 µg/m³ reduktion af PM_{2.5} ved H.C. Andersens Boulevard, så vil PM₁₀ ved H.C. Andersens Boulevard ligeledes blive reduceret med 6 µg/m³ til 16 g/m³ og dermed vil man næsten komme i overensstemmelse med grænsen for PM₁₀.

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

	PM _{2,5} 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.Andersen Boulevard	11	22	27	48
København, Jagtvej	9	17	27	40
Odense, Grønløkkevej		16		36
Aarhus, Banegaardsgade	9	16	26	36
Aalborg, Vesterbro	8		25	
<i>Bybaggrund</i>				
København	8	14	25	32
Aarhus	7		24	
Aalborg	7		24	
<i>Forstad</i>				
Hvidovre	7			
<i>Landbaggrund</i>				
Keldsnor		14		34
Risø	7	13	24	34



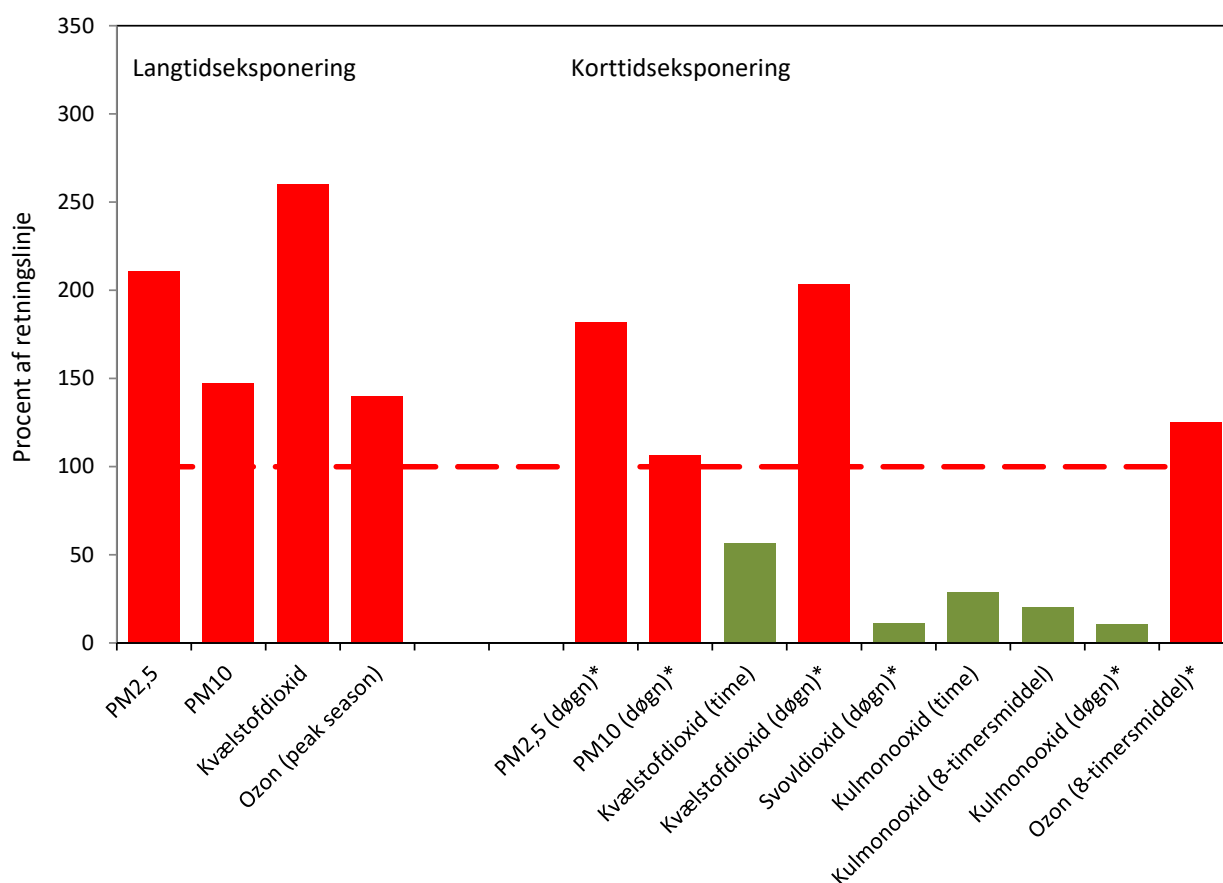
Figur 13.2. Udviklingstendens for årsmiddelværdi af PM_{2.5} (øverst) og PM₁₀ (nederst) sammenlignet med EU's grænseværdier (EU, 2008) og WHO's retningslinjer fra 2006 og 2021 (WHO, 2021a).

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) ligger ved de danske målestationer sammenholdt med de opdaterede retningslinjer fra WHO (2021). Koncentrationerne 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 konsekutive måneder med de højeste værdier. De kortsigtede retningslinjer er fastlagt ud fra kalenderårets højeste time-middelværdi, 99%-fraktile af døgnmiddel og den maksimale daglige 8-timersmiddelværdi. Hvis en parameter er mærket med stjerne angiver det, at det er 99%-fraktile 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

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., Frieese, E., Struzewska, J., Kaminski, J.W., Douros, J., Timmermans, R., Robertson, L., Adani, M., Jorba, O., Joly, M. & Kouznetsov, R. 2021: Estimating lockdown-induced European NO₂ changes using satellite and surface observations and air quality models, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(9), 7373-7394. <https://doi.org/10.5194/acp-21-7373-2021>

Berkowicz, R., 2000a: OSPM - A parameterized street pollution model, *Environmental Monitoring and Assessment* 2000, 65, 323-331. doi: 10.1023/A:1006448321977.

Berkowicz, R., 2000b: A simple model for urban background pollution. *Environ. Monit. Assess.* 65 (1/2), 259-267.

Blomgren, H. 2021: Personlig korrespondance den 27. oktober 2021.

Brandt, J., Christensen, J.H. Frohn, L.M. Palmgren, F. Berkowicz R. & Zlatev, Z., 2001: Operational air pollution forecasts from European to local scale. *Atmospheric Environment*, Vol. 35, Sup. No. 1, pp. S91-S98.

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

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

Brandt, J., J. D. Silver, J. H. Christensen, M. S. Andersen, J. Bønløkke, T. Sigsgaard, C. Geels, A. Gross, A. B. Hansen, K. M. Hansen, G. B. Hedegaard, E. Kaas and L. M. Frohn, 2013a. Contribution from the ten major emission sectors in Europe to the Health-Cost Externalities of Air Pollution using the EVA Model System – an integrated modelling approach. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 13, pp. 7725-7746, 2013. www.atmos-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. http://www.ceeh.dk/CEEH_Reports/Report_3/-CEEH_Scientific_Report3.pdf

Brandt, J., Silver, J.D., Frohn, L.M., Geels, C., Gross, A., Hansen, A.B., Hansen, K.M., Hedegaard, G.B., Skjøth, C.A., Villadsen, H., Zare, A. & Christensen, J.H., 2012: An integrated model study for Europe and North America using the Danish Eulerian Hemispheric Model with focus on intercontinental transport, *Atmospheric Environment*, Volume 53, June 2012, pp. 156-176, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.01.011.

Burnett, R., Chena, H., Szyszkowicz, 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, 2021: <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>

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

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

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

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

Ellermann, T., Bossi, R., Nygaard, J., Christensen, J., Løfstrøm, P., Monies, C., Geels, C., Nilesen, I. E., & Poulsen, M. B., 2020. Atmosfærisk deposition 2019. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. xxs. – Videnskabelig rapport nr. xxx. Under udarbejdelse.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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>.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Mikkelsen, M.H., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Fauser, P., Albrechtsen, R., Hjelgaard, K.H., Bruun, H.G. & Thomsen, M. 2021. Annual Danish Informative Inventory Report to UNECE. Emission inventories from the base year of the protocols to year 2019. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 580 pp. Scientific Report No. 435 <http://dce2.au.dk/pub/SR435.pdf>.

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

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

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

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

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>

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-projectrecommendations-for-concentrationresponse-functions-forcostbenefit-analysis-of-particulate-matter,-ozone-and-nitrogendioxide>

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

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

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

Bilag 1

I overvågningsprogrammet suppleres de permanente målinger med modelberegninger for kvælstofdioxid, $PM_{2,5}$, og PM_{10} på gadeniveau og ozon, på regionalt niveau. Modelberegningerne bliver gennemført med det integrerede multiskala modelsystem DEHM/UBM/AirGIS, som er i stand til at beregne luftforureningskoncentrationer på regionalt niveau og bybaggrunds niveau samt for udvalgte gader på begge vejsider. Modelsystemet DEHM/UBM/AirGIS består af følgende modeller: Danish Eulerian Hemispheric Model, DEHM (Christensen, 1997; Brandt et al., 2012), Urban Background Model, UBM (Brandt et al., 2001; Brandt et al., 2003) 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. Model opsætning for denne rapportering for 2020 er tæt på opsætningen for 2013 og efterfølgende år.

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

Sammenligning mellem model og målinger for kvælstofdioxid-koncentrationerne for 2020 er vist i tabel A.1.

Sammenligning mellem model og målinger for kvælstofdioxid-koncentrationerne for 2020 viser en overestimering på 15% til 30% for fire ud af fem gadestationer. For den femte gadestation i Odense er overestimeringen på 55%. Den har også i foregående år været signifikant overestimeret. Der er også overestimering på bybaggrunds-, forstads- og landbaggrundsstationer.

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

Tabel A.1. Sammenligning af modellerede og målte årsmiddelkoncentrationer for kvælstofdioxid i 2020.

Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Målinger	Modelresultater	Difference	Model
Gade:				
København/HCAB / 1103	26.2	32.6	25%	DEHM/UBM/OSPM
København/Jagtvej / 1257	19.3	25.2	30%	DEHM/UBM/OSPM
Aarhus / 6153	20.1	23.2	15%	DEHM/UBM/OSPM
Aalborg / 8152	18.2	22.9	26%	DEHM/UBM/OSPM
Odense / 9156	11.9	18.5	55%	DEHM/UBM/OSPM
Bybaggrund:				
København / 1259	9.0	12.7	41%	DEHM/UBM
Aarhus / 6160	9.3	11.5	24%	DEHM/UBM
Odense / 9159	8.8	10.5	19%	DEHM/UBM
Aalborg / 8159	8.3	10.0	20%	DEHM/UBM
Forstad:				
Hvidovre / 2650	8.7	10.9	25%	DEHM/UBM
Landbaggrund:				
Risø / 2090	5.4	9.4	75%	DEHM/UBM
Keldsnor / 9055	6.3	10.8	71%	DEHM/UBM
Ulborg / 7060	3.2	5.2	64%	DEHM/UBM
Anholt / 6001	3.6	8.0	125%	DEHM/UBM

Sammenligning mellem modellerede og målte $\text{PM}_{2.5}$ - og PM_{10} -koncentrationer er vist hhv. i tabel A.2 og tabel A.3. De modellerede data er inklusive modelkalibreringen, som er beskrevet i næste afsnit. De modellerede partikelkoncentrationer for både $\text{PM}_{2.5}$ og PM_{10} på de fire gadestationer ligger forholdsvis tæt på de målte værdier med mindre relative afvigelser fra -6% til 20%. Der er en general overestimering på bybaggrunds-, forstads- og landbaggrundsstationer fra 4% til 26%.

De modellerede $\text{PM}_{2.5}$ -årsmiddelkoncentrationerne er væsentligt under EU's grænseværdi på $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, men væsentligt over WHO's nye retningslinjer på $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, hvilket gælder alle typer af stationer.

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

Tabel A.2. Sammenligning mellem årsmidler af modellerede (inkl. korrektion) og målte PM_{2,5}-koncentrationer i 2020. Målinger i denne tabel er angivet for atmosfæriske standard betingelser, mens tabellen i kapitel 7 giver værdier under ambient betingelser. Derfor optræder der minimale forskelle.

Enhed: µg/m ³	Målinger	Modelresultater	Difference	Model anvendt
Gade:				
Copenhagen/HCAB / 1103	11.1	11.6	5%	DEHM/UBM/OSPM
Copenhagen/Jagtvej / 1257	9.7	10.9	13%	DEHM/UBM/OSPM
Aarhus / 6153	9.2	10.3	12%	DEHM/UBM/OSPM
Aalborg / 8152	8.2	9.6	17%	DEHM/UBM/OSPM
Bybaggrund:				
Copenhagen / 1259	8.4	9.1	8%	DEHM/UBM
Aarhus / 6160	7.2	8.8	22%	DEHM/UBM
Aalborg / 8159	7.6	7.9	4%	DEHM/UBM
Forstad:				
Hvidovre / 2650	7.7	8.9	16%	DEHM/UBM
Landbaggrund:				
Risø / 2090	7.8	8.9	14%	DEHM/UBM

Tabel A.3. Sammenligning mellem modellerede og målte PM₁₀-koncentrationer i 2020. Målinger i denne tabel er angivet for atmosfæriske standard betingelser, mens tabellen i kapitel 7 giver værdier under ambient betingelser. Derfor optræder der minimale forskelle.

Enhed: µg/m ³	Målinger	Modelresultater	Difference	Model anvendt
Gade:				
København/HCAB / 1103	23.2	21.9	-6%	DEHM/UBM/OSPM
København/Jagtvej / 1257	18.3	19.9	9%	DEHM/UBM/OSPM
Aarhus / 6153	17.1	20.4	20%	DEHM/UBM/OSPM
Odense / 9156	17.2	20.6	20%	DEHM/UBM/OSPM
Bybaggrund:				
Copenhagen / 1259	14.4	15.8	10%	DEHM/UBM
Landbaggrund:				
Risø / 2090	13.3	15.9	19%	DEHM/UBM
Keldsnor / 9055	14.5	18.3	26%	DEHM/UBM

Detaljer om kalibrering af OSPM og validering af modelresultater

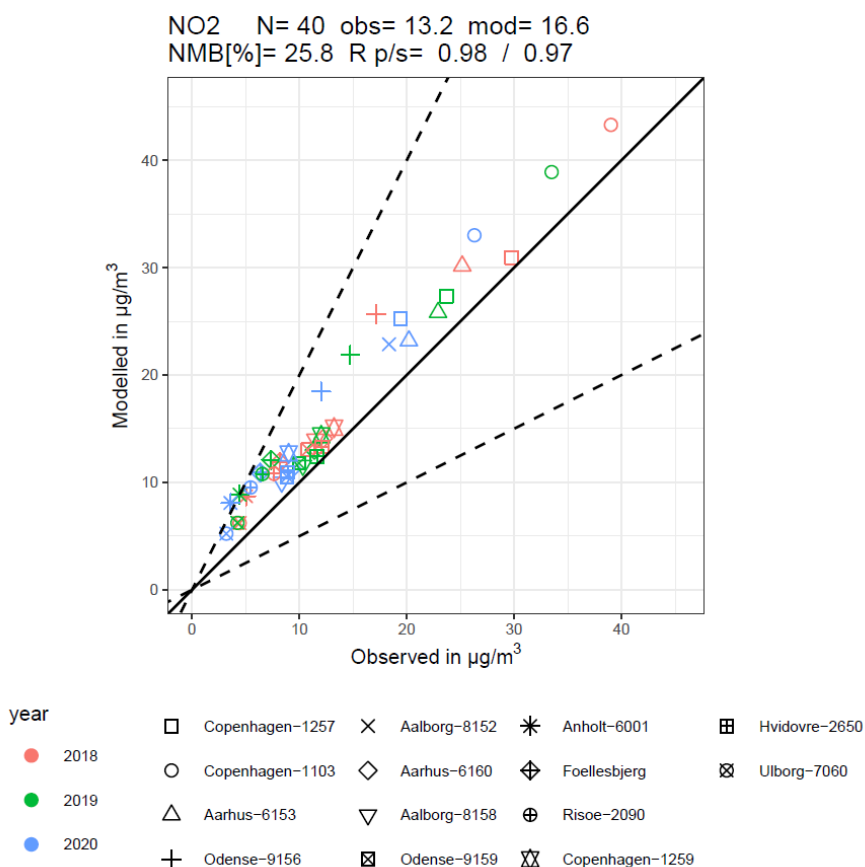
For PM_{2,5}/PM₁₀ var kalibrering nødvendigt, da sammenligninger mellem model og målingerne viste en konsistent undervurdering. Den observerede undervurdering var især påfaldende for baggrundstationerne (land- og bybaggrund) og vedrører det ikke-lokale bidrag til PM_{2,5}/PM₁₀, som er modelleret med DEHM og UBM. Det lokale bidrag, modelleret med OSPM, viste sig at være i god overensstemmelse med det målte lokale bidrag, dvs. differencen mellem gade- og bybaggrundstationer. Derfor er kalibrering kun anvendt på modellerede PM-koncentrationer fra DEHM- og UBM-modellerne. Grunden til undervurdering af modellerede PM-koncentrationer ligger i manglende eller underestimerede bidrag, som formodes at være vand bundet i partikler og

underestimering af sekundære organiske partikler (SOA) og ikke-udstødningspartikler. Kalibrering medfører, at PM-koncentrationer beregnet med DEHM eller UBM bliver øget med en faktor på 1,33. I alle figurer og tabeller i dette bilag, samt i hele hovedrapporten er vist de kalibrerede PM_{2.5}/PM₁₀-modelresultater.

Nedenunder viser vi en række scatter plots, som illustrerer sammenhængen mellem modelberegningerne og målinger. Figurerne indeholder data for årene 2018 til 2020 fra alle stationer: Gade, bybaggrund og landstationer. Vi vælger at inkludere data fra tre år for at have et tilstrækkeligt antal observationer til at vurdere modelperformance med og for at udglatte udsving, som kunne optræde, hvis kun et enkelt år blev brugt.

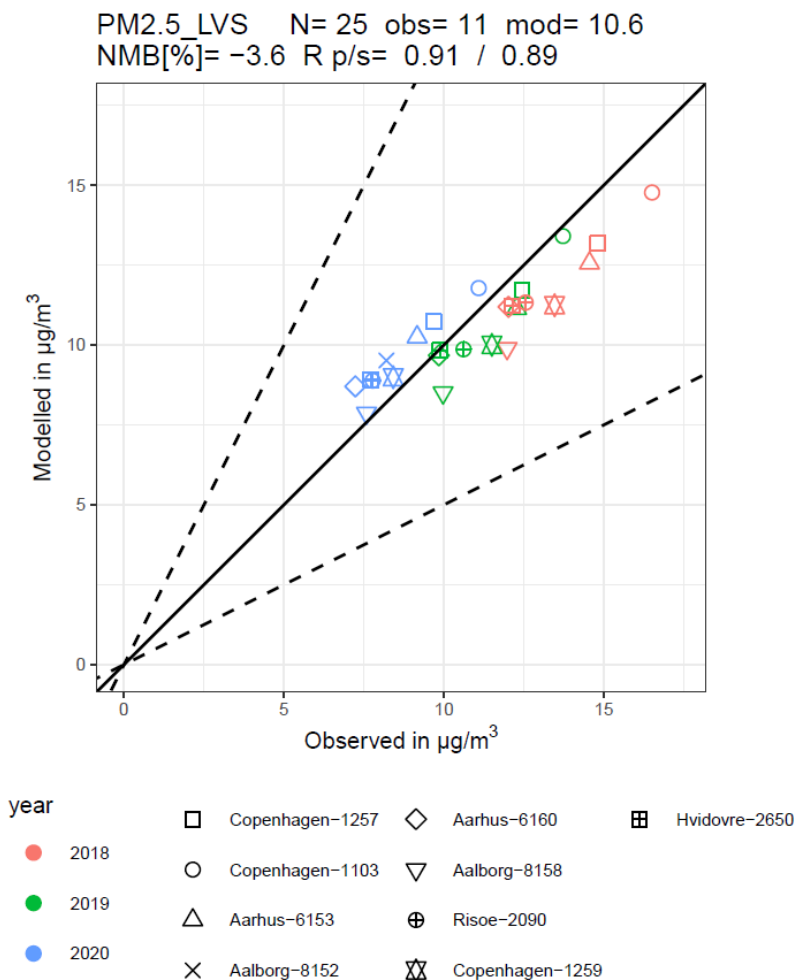
De forskellige målestationer med navn og stationsnumre er angivet i figurenes signaturforklaringer.

I figur A.1 vises korrelation mellem modelleret og målt årsmiddel for kvælstofdioxid fra 2018 til 2020. Der findes 40 datapunkter og det gennemsnitlige målte niveau er 13,2 µg/m³, mens modelleret niveau er 16,6 µg/m³. Korrelationskoefficienter efter Pearson eller Spearman (R p/s) er meget høj (0,98 / 0,97) og den Normalized Mean Bias (NMB%) er tilstrækkelig lav (25,8%) - ca. på niveau med sidste års rapportering.



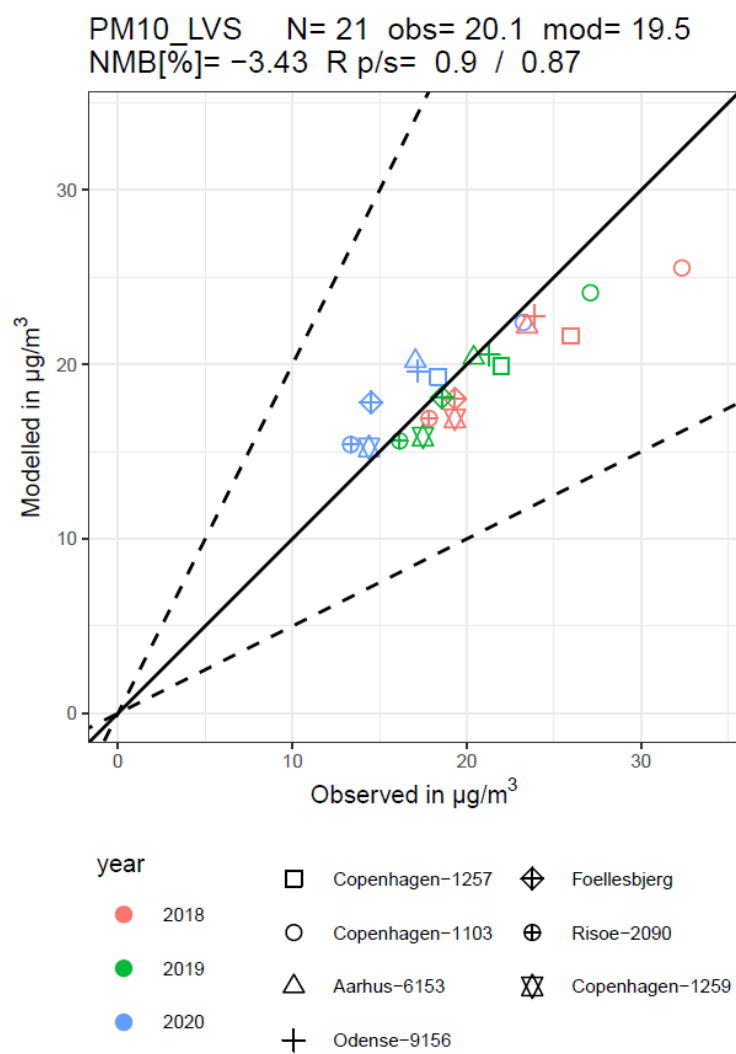
Figur A.1. Sammenligning mellem korrigerede modellerede og målte årsmiddelkoncentrationer af kvælstofdioxid for alle stationer for 2018-2020.

I figur A.2 vises sammenhæng mellem korregeret modelleret og målt årsmiddel for PM_{2,5} fra 2018 til 2020. Der findes 25 datapunkter og det gennemsnitlige målte niveau er 11 µg/m³, mens modelleret niveau er 10,6 µg/m³. Korrelationskoefficienter efter Pearson eller Spearman (R p/s) er meget høj (0,91 og 0,89) og den Normalized Mean Bias (NMB%) er meget lav (-3,6%), og er på samme niveau i sammenligning med sidste års rapportering.



Figur A.2. Sammenligning mellem de korregerede modellerede og målte årsmiddeldkoncentrationer af PM_{2,5} for alle stationer for 2018-2020.

I figur A.3 vises sammenhængen mellem de korregeret modelleret og målt årsmiddel for PM₁₀ fra 2018 til 2020. Der findes 21 datapunkter og det gennemsnitlige målte niveau er 20,1 µg/m³, mens modelleret niveau er 19,5 µg/m³. Korrelationskoefficienter efter Pearson eller Spearman (R p/s) er meget høj (0,90 og 0,87) og den Normalized Mean Bias (NMB%) er meget lav (-3,4 %), og er på samme niveau i sammenligning med sidste års rapportering.



Figur A.3. Sammenligning mellem korrigerede modellerede og målte årsmiddelkoncentrationer af PM_{10} for alle stationer for 2018-2020.

LUFTKVALITET 2020

Status for den nationale luftkvalitetsovervågning i Danmark

Rapporten giver en status for 2020 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 2020 blev luftkvaliteten målt i de fire største byer og ved fire målestationer i baggrundsområder uden for byerne. I 2020 blev der ikke målt overskridelser af EU's grænse- og målværdier i Danmark. Endvidere blev der gennemført modelberegninger for luftkvaliteten i Aalborg og København. Modelberegningerne viste heller ingen overskridelser af grænseværdien. Luftkoncentrationerne har for langt de fleste luftforureningskomponenter været faldene gennem de seneste årtier, hvilket skyldes faldet i udledningerne i Danmark og de øvrige europæiske lande. Modelberegningerne af helbredseffekterne viser, at der i 2019 var omkring 4.600 for tidlige dødfald, samt en række andre helbredseffekter som følge af luftforureningen. Antallet af for tidlig som følge af luftforureningen er aftaget med omkring 40% siden 1990.

ISBN: 978-87-7156-637-6
ISSN: 2244-9981