

Kortlægning af luftkvalitet og befolknings- eksponering langs statsvejene i Danmark

Steen Solvang Jensen^{1,*}, Matthias Ketzel^{1,2}, Jibrán Khan^{1,3}

¹ Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet, Roskilde

*ssj@envs.au.dk

² Global Centre for Clean Air Research (GCARE), University of Surrey, United Kingdom

³ Danish Big Data Centre for Environment and Health (BERTHA), Aarhus Universitet, Roskilde

Article info

Article history

Received 2023 09 15

Received in revised
form 2025 01 21

Accepted 2025 03 03

Keywords:

air quality

OML-Highway model

Abstract

This article describes the results of a mapping of air quality in 2019 along state roads throughout Denmark. The mapping has been carried out with an improved version of the OML-Highway model, and the methods and data used have been described. In the air quality mapping, the annual mean values of NO₂, PM_{2.5} and PM₁₀, which are health related pollutants, are calculated at all addresses. The number of affected homes and people along the road network is estimated to describe the exposure of the population to air pollution. Air quality is compared with current and revised EU limit values, the latter to be complied with in 2030, and WHO air quality guidelines from 2021. The mapping shows that at a distance of 1,000 m from the state road network, approx. 1.5 million people live in approx. 3/4 million housing units distributed over approx. half a million addresses. All people along the state road network live at addresses that are below the limit value for NO₂. Only approx. 500 people (0.04%) live at addresses where the revised EU limit value is exceeded. On the other hand, approx. 49% live at addresses that exceed WHO guidelines from 2021. For PM_{2.5}, everyone lives at addresses that are below the limit value, but approx. 49% live at addresses with concentrations of PM_{2.5} that exceed the revised EU limit value, and all addresses exceed WHO guidelines. For PM₁₀, all people live at addresses below the limit value, but approx. 2% live at addresses with PM₁₀ concentrations exceeding the revised EU limit value, and approx. 97% live at addresses exceeding WHO guidelines from 2021. Air quality levels and population exposure along state roads are a combination of the background contribution and the contribution from the state roads.

Abstrakt

Denne artikel beskriver resultaterne af en kortlægning af luftkvaliteten i 2019 langs statsvejene i hele Danmark. Kortlægningen er gennemført med en forbedret version af OML-Highway modellen, og anvendte metoder og datagrundlag er beskrevet. I luftkvalitetskortlægningen beregnes på alle adresser årsmiddelværdien af NO₂, PM_{2.5} og PM₁₀, som er udvalgte luftforurenende stoffer relateret til helbredseffekter. Antallet af berørte boliger og mennesker langs vejnettet er estimeret for at beskrive

befolkningens eksponering for luftforurening. Luftkvaliteten er sammenlignet med EU's grænseværdier fra 2008 og de reviderede grænseværdier foreslået i 2022 og vedtaget i 2024 samt WHO's retningslinjer for luftkvalitet fra 2021. Kortlægningen viser, at der i en afstand af 1.000 m fra statsvejnettet bor omkring 1,5 million mennesker i omkring ¼ million boligenheder fordelt på omkring en halv million adresser. Alle mennesker langs statsvejnettet bor på adresser, som er under grænseværdien for NO₂. Kun godt 500 personer (0,04 %) bor på adresser, hvor den reviderede EU-grænseværdi gældende i 2030 overskrides. Til gengæld bor omkring 49 % på adresser, som overskrider WHO-**retningslinjer**. For PM_{2,5} bor alle på adresser, som er under grænseværdien, men omkring 49 % bor på adresser med PM_{2,5}-koncentrationer, som overskrider den reviderede EU-grænseværdi gældende i 2030, og alle adresser overskrider WHO-retningslinjer fra 2021. For PM₁₀ bor alle mennesker på adresser under grænseværdien, men omkring 2 % bor på adresser med PM₁₀-koncentrationer, som overskrider den reviderede EU-grænseværdi gældende i 2030, og omkring 97 % bor på adresser, som overskrider WHO-retningslinjer fra 2021. Luftkvalitetsniveauerne og befolkningseksponering langs statsvejene er en kombination af baggrundsbidraget og statsvejenes bidrag.

1. Introduktion

Modelberegninger af helbredseffekter af luftforurening i 2023 viser, at luftforureningen er skyld i omkring 3.300 for tidlige dødsfald og en lang række andre negative helbredseffekter, og de samlede tilhørende eksterne omkostninger, som følge af luftforureningen i Danmark fra såvel udenlandske som danske kilder, er på omkring 60 milliarder kr. Omkring 750 tilfælde af de for tidlige dødsfald kan tilskrives udledninger fra danske kilder, hvilket svarer til omkring 23 % af det samlede antal for tidlige dødsfald som følge af luftforureningen i Danmark. De resterende omkring 77 % stammer fra udenlandske udledninger, herunder naturlige kilder og international skibstrafik. Tilsvarende fordeling mellem danske og udenlandske udledninger ses for eksterne omkostninger som følge af luftforureningen. Beregningerne viser også, at danske udledninger er ansvarlig for omkring 1.600 for tidlige dødsfald i udlandet. Vejtransportsektoren i Danmark bidrager med omkring 100 for tidlige dødsfald i Danmark, som har været faldende pga. faldende emissioner (Nordstrøm et al., 2024).

Den Europæiske Union (EU) regulerer luftkvaliteten for udvalgte forurenende stoffer baseret på grænseværdier for luftkvalitet, som implementeres i dansk lovgivning. Det eksisterende luftkvalitetsdirektiv fra 2008 (EU, 2008) er i slutningen af 2024 blev strammet i et revideret luftkvalitetsdirektiv, hvor de nye grænseværdier bliver gældende i 2030 (EU, 2024). Endvidere reguleres emissioner baseret på nationale emissionslofter for medlemslandene, og der er også kildespecifik regulering for emissionssektorer f.eks. for køretøjer. Grænseværdier er juridisk bindende, og Miljøstyrelsen har ansvaret for at de overholdes og skal gennem handleplaner for hurtigst muligt at overholde grænseværdierne i tilfælde af, at de er overskredet.

Verdenssundhedsorganisationen (WHO) offentliggjorde opdaterede retningslinjer for luftkvalitet i 2021 (WHO, 2021), der er strengere end retningslinjer for luftkvalitet fra 2005 (WHO, 2005) og også strengere end EU's grænseværdier fra 2008 og de nye grænseværdier gældende fra 2030. WHO's retningslinjer for luftkvalitet er anbefalinger og ikke juridisk bindende som EU-grænseværdier.

Længden af statsvejnettet i Danmark er omkring 3.826 km fordelt på motorveje, motortrafikveje og øvrige statsveje (Vejdirektoratet, 2022). I en afstand af 1.000 m fra statsvejnettet bor der omkring 1,5 million mennesker i omkring ¼ million boligenheder fordelt på omkring en halv million adresser.

Vejdirektoratet har tidligere finansieret udvikling og forskellige anvendelser af beregningsprogrammet OML-Highway, som er et GIS-baseret værktøj til beregning af luftkvalitet langs veje i åbent terræn. OML-Highway modellen har tidligere været anvendt til kortlægning af koncentrationsniveauer langs hele motorvejsnettet i det tidligere Roskilde Amt (Jensen et al. 2005a,b) og kortlægning af luftkvalitet langs statsvejene i hele Danmark med 2012 data (Jensen et al., 2015).

Luftkvalitetskortlægning langs statsvejnettet vil kunne bruges af vejmyndigheder som et screeningsværktøj i forbindelse med kommende MKV (Miljøkonsekvensvurdering) af vejprojekter. OML-Highway har været anvendt i forbindelse med miljøkonsekvensvurderinger i 2010-2011 i forbindelse med udvidelse af motorvej

omkring Odense, 3. Limfjordsforbindelse ved Aalborg, samt udbygning af rute 26 Aarhus-Viborg (Jensen et al., 2011a,b,c). I slutningen af 2013 udgav Vejdirektoratet en vejledning i luftkvalitetsvurdering langs motorveje, som bygger på de erfaringer, der er gjort med OML-Highway i miljøkonsekvensvurderinger (Jensen et al., 2013) samt støttede udarbejdelse af en brugermanual på engelsk til OML-Highway (Olesen et al., 2015).

Kortlægningen kan endvidere være en miljøindikator i forbindelse med Vejdirektoratets årlige redegørelser for vejnettet og miljøforhold, og en kilde til information om luftkvalitet for borgere, da Vejdirektorat vil lægge luftkvalitetsdata på Vejdirektoratets hjemmeside, således at alle kan tilgå luftkvalitetskortet.

I nærværende projekt har DCE-Nationalt Center for Miljø og Energi på Aarhus Universitet opdateret kortlægningen fra 2012 med data for 2019 og med en forbedret version af OML-Highway modellen (Løfstrøm, 2020, Jensen et al., 2023). Som noget nyt omfatter kortlægningen også en opgørelse af berørte boliger og befolkningseksposering for luftforurening samt en sammenligning af beregnede luftkvalitets-niveauer med EU's grænseværdier for luftkvalitet, som er bindende og WHO's retningslinjer for luftkvalitet, som er vejledende.

Luftkvalitetskortet viser udvalgte luftforurenende stoffer relateret til helbredseffekter. Det er beregnede årsmiddelkoncentrationer i 2019 af NO₂ (kvælstofdioxid) og af luftbårne partikler angivet ved PM₁₀ og PM_{2,5}, som er henholdsvis den samlede masse af partikler med en diameter under 10 og 2,5 mikrometer. PM_{2,5} udgør den største helbredsbelastning i Danmark ifølge DCE's helbredsregninger for luftforureningen i Danmark (Ellermann et al., 2023). Beregningerne er gennemført for beregnings-punkter i forskellige afstande fra vejen ud til 1.000 m, hvorefter bidraget fra vejen er marginalt.

2. Metode og datagrundlag

I det følgende beskrives metode og datagrundlag for beregningerne af luftkvaliteten langs med statsvejnettet. Der gives først en kort beskrivelse af OML-Highway modellen, som kræver information om vejnettet med trafikdata, baggrundskoncentrationer, meteorologi samt beregningspunkter.

2.1 OML-Highway modellen

OML-Highway er en gaussisk lokalskala spredningsmodel specielt udviklet til at beskrive spredning af luftforurening langs med veje i åbnet terræn (Jensen et al., 2010a,b; 2012; www.au.dk/OML-Highway). OML-Highway er baseret på OML modellen (Olesen et al. 1992; 2007), som bl.a. benyttes til vurdering af luftkvalitet fra punktkilder i forbindelse med miljøgodkendelser. OML-modellen blev modificeret således, at den tager hensyn til forholdene for veje i åbent terræn ved at integrere og videreudvikle en beskrivelse af effekten af trafikskabt turbulens på spredningen af luftkoncentrationer. Den matematiske beskrivelse af trafikskabt turbulens stammer fra gadeluftkvalitetsmodellen Operational Street Pollution Model (OSPM) (Berkowicz 2000a; Kakosimos et al. 2011).

Tidligere valideringer af OML-Highway modellen mod målinger

Validering af OML-Highway modellen er blevet foretaget i forbindelse med udvikling og opdatering af modellen, og har omfattet NO₂, PM_{2,5} og PM₁₀.

OML-Highway modellen er detaljeret evalueret i forhold til målinger langs med Køge Bugt Motorvejen (Jensen et al. 2004). Der er endvidere foretaget en evaluering af OML-Highway modellen baseret på danske målinger (Køge Bugt Motorvejen) og norske målinger samt en sammenligning med andre spredningsmodeller, som anvendes i de nordiske lande for motorveje (Berger et al. 2010). I denne evaluering havde OML-Highway modellen en højere korrelation med målingerne end de andre modeller, som indgik i evalueringen. Der har endvidere været gennemført en målekampagne på Holbækmotorvejen med det formål at bestemme og evaluere emissionsfaktorer for partikelemission (PM₁₀ og PM_{2,5} – partikler under hhv. 10 og 2,5 mikrometer) (Ellermann et al. 2009). Den samme målekampagne fra Holbækmotorvejen har også været brugt til at sammenligne målinger af gasser og partikelforurening med en trafikeret bygade i København - H.C. Andersens Boulevard (Wang et al. 2010). En kortlægning af luftkvalitet langs statsvejene

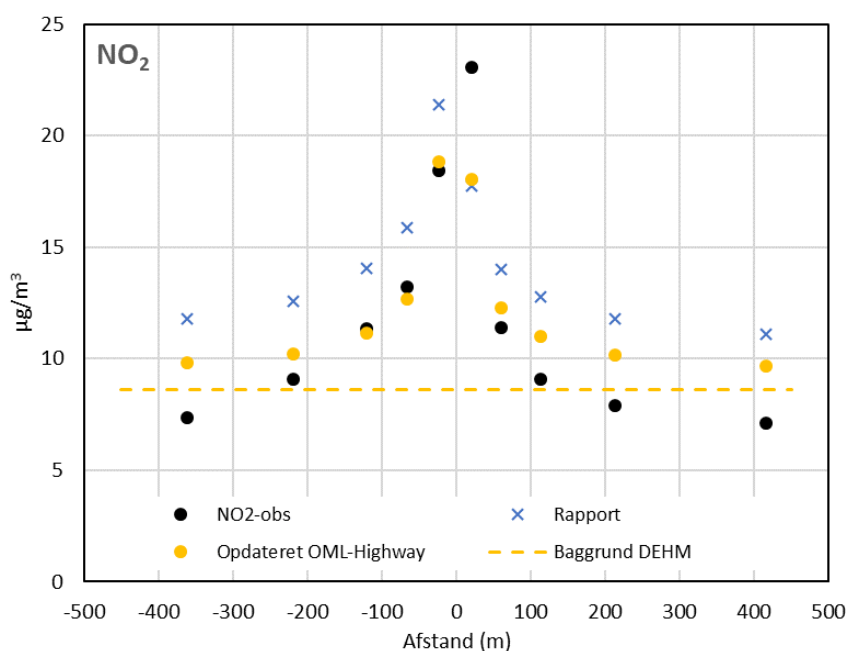
repræsenterende 2012 data (Jensen et al., 2015) viste tendens til overestimering af koncentrationerne længere væk fra vejen, og derfor blev en ny sammenligning mellem model og målinger i 2016 gennemført med en målekampagne ved Svogerslev (Jensen et al., 2017).

Forbedring af OML-Highway

På baggrund af datasættet fra Svogerslev (Jensen et al., 2017) indeholdende NO₂ målinger har DCE forbedret den fysiske beskrivelse i OML-Highway, således at der opnås endnu bedre resultater mellem modelresultater og målinger, hvilket også har resulteret i bedre sammenhæng længere væk fra vejen (Løfstrøm, 2020). Det er med udgangspunkt i den forbedrede version af OML-Highway, at nærværende opdaterede kortlægning af luftkvaliteten langs statsvejene er foretaget. I forbindelse med forbedringen er der sket en række optimeringer af modelkoden, som beskrives i det følgende.

Den trafikskabte turbulens har i OML-Highway hidtil kun påvirket den vertikale spredning. Nu er effekten også indbygget i den horisontale spredning, hvilket har betydning, når vindretningen er en nær parallel med vejen. Det areal en personbil påvirker den trafikskabte turbulens med er ændret fra 4 m² til 2 m², og er nu i overensstemmelse med Operational Street Pollution Model (OSPM), som bl.a. benyttes til luftkvalitetsberegninger i gaderum. Ligeledes er den initiale startspredning ændret fra 4 m til 2 m. Dette har størst betydning tættest på motorvejen med lidt højere koncentrationer og aftager til ringe betydning i ca. 100 meters afstand fra motorvejen. I spredningen fra motorveje indgår den såkaldte fortyndingsfaktor, som er knyttet til vindhastigheden beregnet for en udslipshøjde på 1 m. Men med stigende afstand øges røgfanens vertikale udstrækning. Herved bliver fortyndingsfaktoren også påvirket af de større vindhastigheder i højden. Dette forhold er nu inkluderet i modellen. Med stigende afstand vil koncentrationerne reduceres mere og mere i forhold til tidligere.

Disse justeringer har medført en tydelig forbedring af modellen med bedre overensstemmelse mellem model og målinger for NO₂ også længere væk fra vejen, se Figur 2.1. I beregningerne er anvendt baggrundskoncentrationer fra DEHM, som ser ud til at være overestimeret, da beregnede baggrundskoncentrationer ligger over målingerne længere væk fra vejen. Dermed bliver OML-Highway beregningerne også højere længere væk fra vejen end de burde være, og der ville være endnu bedre overensstemmelse med målingerne, hvis de beregnede baggrundskoncentrationer havde været lavere det pågældende sted.



Figur 2.1. Målte og beregnede NO₂-koncentrationer (6 uger) i 2016 i forskellige afstande nord og syd for motorvej ved Svogerslev. Positive afstande er mod syd. "NO₂-obs" henviser til målingerne, og "Rapport" til beregninger i Jensen et al., 2017.

2.2 Overordnet metodebeskrivelse og input data

OML-Highway modellen kræver information om vejnettet med trafikdata, baggrundskoncentrationer, meteorologi samt beregningspunkter. Metode og input data er detaljeret beskrevet i Jensen et al. (2023) og kort skitseret i det følgende.

Beregningspunkter, også kaldet receptorpunkter, er punkter, hvor koncentrationen af forskellige luftforureninger beregnes. OML-Highway kan generere beregningspunkter på en række forskellige måder. Det influensområde, som dækkes, er - på samme måde som for trafikstøj - alle boliger, som er beliggende inden for en afstand af 1.000 m fra beregningsvejene. I afstande over 1.000 m er der kun en marginal indflydelse af emissioner fra vejen. Afstanden mellem beregningspunkter indbyrdes på langs af vejen er ligeledes valgt til 1.000 m. Beregningspunkter fra vejmidten er generet i følgende afstande 25 m, 50 m, 75 m, 100 m, 137.5 m, 212.5 m, 431.25 m, 800 m. Beregningspunktet er samtidig midtpunkt for en bufferzone, og boliger her inden for tilskrives den beregnede koncentration i beregningspunktet.

Vejnettet er baseret på dataset fra vejman.dk, som omfatter alle statsveje, og udtræk stammer fra 17.12.2021, og repræsenterer dermed trafikinformationer fra 2021. Nødvendige vej- og trafikparametre for kørebanebredde, årsdøgntrafik, køretøjsfordeling samt døgnfordeling baseret på vejtype er generet ud fra vejman.dk. Som noget nyt er der anvendt GPS-baserede rejsehastighedsdata fra INRIX, som er erhvervet gennem Vejdirektoratet, hvor der tidligere blev anvendt SpeedMap data fra Vejdirektoratet. Rejsehastighedsdata repræsenterer 2019.

Emissioner for trafikken er baseret på den officielle EU-emissionsmodel COPERT V (EMEP/EEA 2019), som anbefales af EU til nationale emissionsopgørelser, og som er integreret i OML-Highway. Emissioner repræsenterer 2019.

Baggrundskoncentrationer for 2019 er beregnet med den regionale model Danish Eulerian Hemispheric Model (DEHM) (Christensen, 1997; Brandt et al., 2012) og en baggrundsmode med høj opløsning - Urban Background Model (UBM) (Berkowicz, 2000b; Brandt et al., 2003) med tilhørende emissions- og meteorologidata for alle 1 km x 1 km gitterceller i Danmark, som indeholder beregningspunkter langs statsvejnettet. For Danmark er emissioner baseret på emissionsmodellen SPREAD (Plejdrup et al., 2021), som har emissioner for hele Danmark fra alle kilder på 1 km x 1 km gitterceller. De nævnte modeller og data er udviklet af AU/DCE.

Regionale modeller som DEHM, der beskriver baggrundsluftforureningen, har en tendens til at underestimere koncentrationen af $PM_{2,5}$, når man sammenligner modellernes resultater med målinger. PM_{10} bliver dermed også underestimeret, da $PM_{2,5}$ er en del af PM_{10} . I international litteratur benævnes dette som "the mass closure problem" eller "missing mass problem". Sandsynligvis består en del af den "manglende masse" af vand i partiklerne, men skyldes også processer, som ikke til fulde er beskrevet i den regionale model, som fx dannelsen af sekundære organiske partikler (SOA), men også usikkerheder i emissionsbestemmelse af fx mekanisk dannede partikler. Resultat af analyse mellem målinger og modelresultater for $PM_{2,5}$ viser, at modellerne skal opjusteres med 33 % for at matche målingerne (Ellermann et al., 2023). Det betyder, at $PM_{2,5}$ -koncentrationerne er underestimeret med omkring 33 %. I 2019 er baggrundskoncentrationerne af $PM_{2,5}$ og PM_{10} ganget med en faktor på 1,33 for at tage højde for dette, og det er de korrigerede baggrundskoncentrationer, som er anvendt og vises i det følgende. Forudsætningerne for denne kalibrering er nærmere beskrevet i Ellermann et al. (2023). Denne justering er foretaget for at give en bedre sammenligning med grænseværdier og retningslinjer for luftkvalitet.

Nødvendige meteorologiske data fra 2019 er genereret med den meteorologiske model WRF (Weather Research and Forecasting Model) (Skamarock et al. (2008) for detaljer).

OML-Highway har et værktøj til generering af beregningspunkter langs vejnettet, samt dannelse af sammenhængende bufferzoner for visualisering af resultater.

Der ses bort fra indflydelse fra støjskærme, støjvolde, og dæmninger og broer, da det er vanskeligt at knytte disse data til vejnettet på en måde, så effekten kan beregnes med OML-Highway, og fordi indflydelsen på luftkvaliteten er begrænset (Jensen et al., 2013).

OML-Highway beregner emissioner fra statsvejene. SPREAD indeholder ligeledes vejemissioner fra både stats- og kommunevejnettet, hvilket fører til dobbelttælling af emissioner fra statsvejene, og dette skal der derfor tages højde for. Dette er gjort ved at gennemføre en separat beregning med OML-Highway, hvor emissioner fra hele statsvejnettet bliver lagt ud på 1 km x 1 km gitterceller og betragtet som "baggrundskoncentrationer". Det endelige resultat bestemmes af koncentrationer fra den "fulde beregning" (for hver enkelt receptor) minus "ekstra beregning" (gældende for den 1 km x 1 km gittercelle beregningspunktet ligger i) for at undgå dobbelttælling.

For ikke-reaktive stoffer som PM_{2.5} og PM₁₀ kan ovenstående beregninger gennemføres uden justeringer. NO_x består af NO og NO₂. Da NO₂ indgår i fotokemi, er der ikke en lineær sammenhæng mellem NO_x og NO₂, og NO₂-bidraget fra statsvejene er derfor beregnet ud fra en simplificeret kemimodel (Düring et al., 2011). som er baseret på årsmiddel af NO_x-, NO₂- og ozonkoncentrationer samt oplysninger om direkte NO₂-emissioner fra trafikken.

For at kunne håndtere de mange separate OML-Highway beregninger samt korrektion for dobbelttælling blev hele data-flow i dette projekt gennemført med hjælp af nyudviklede programmeringsscripts baseret på programmeringssproget R (R Core Team, 2023). Disse R-scripts omfatter både generering og reformattering af inputdata, igangsættelse af OML-Highway beregningerne samt efterbehandling af resultaterne.

Den beregnede luftkvalitet i 2019 er sammenlignet med gældende grænseværdier (EU, 2008), EU's nye forslag til reviderede grænseværdier fra oktober 2022 (EU-Kommission, 2022), og WHO's vejledende retningslinjer for luftkvalitet fra 2005 (WHO, 2005) samt nye anbefalinger fra 2021 (WHO, 2021).

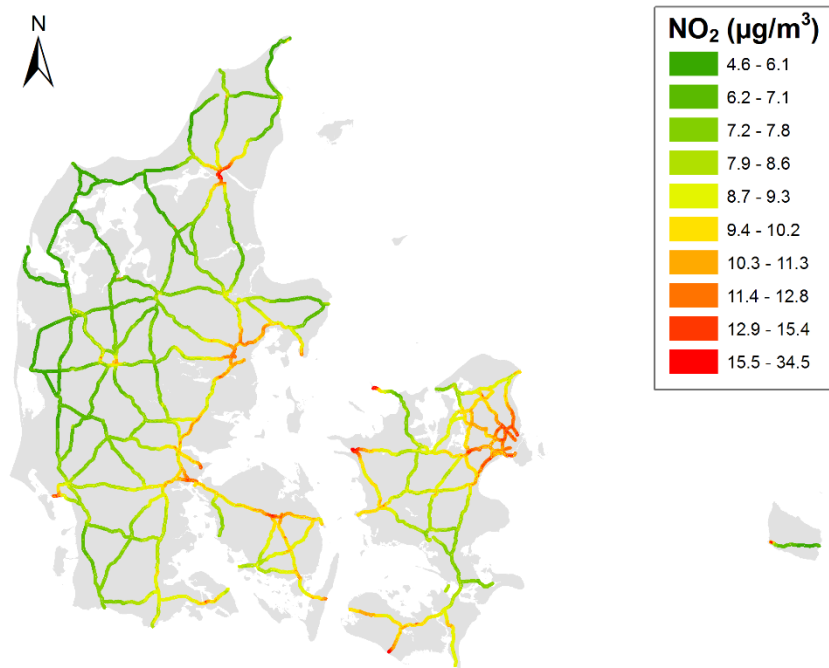
Antallet og typen af berørte boliger inden for 1.000 m af statsvejnettet er beregnet ud fra data fra Bygnings- og Boligregisteret (BBR) (fra oktober 2021) samt antal mennesker ud fra det Centrale Personregister (CPR) (fra 23.3.2022), og dette er sat i forhold til luftforureningen for at belyse befolkningseksponeringen. BBR er brugt til at belyse sammenhængen mellem boligtyper og luftforurening.

3. Resultater

3.1 Luftkvalitet langs statsvejnettet

Geografisk beskrivelse for NO₂

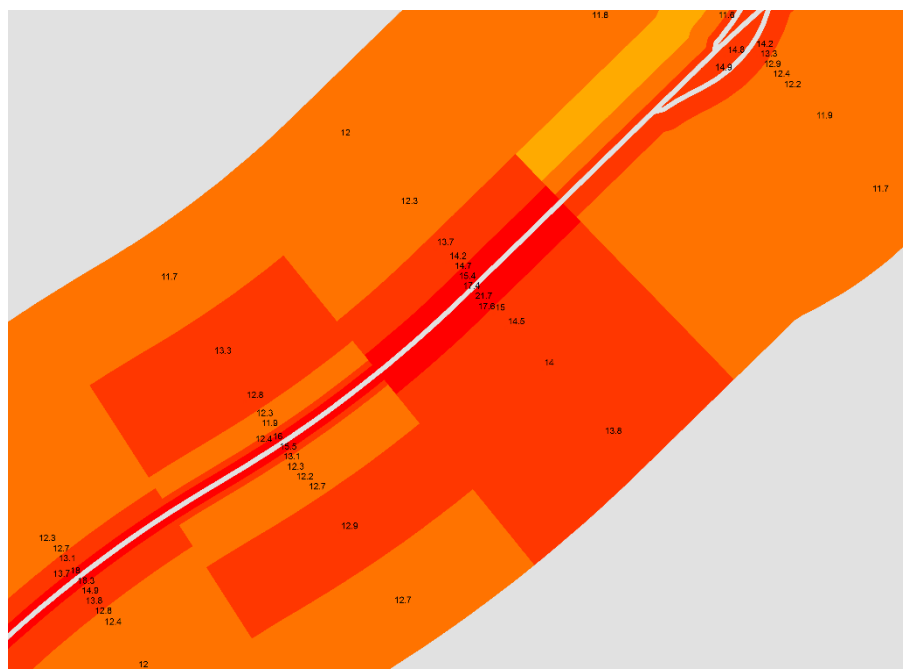
Den geografiske variation af NO₂ i 2019 er vist i Figur 3.1. Som forventet er koncentrationerne højest på de mest trafikerede motorvejsstrækninger i Hovedstadsområdet og langs dele af E20 over Fyn og E45 gennem Jylland.



Figur 3.1. Geografiske variation af NO₂ som årsmiddelværdi i 2019 for statsvejnettet.

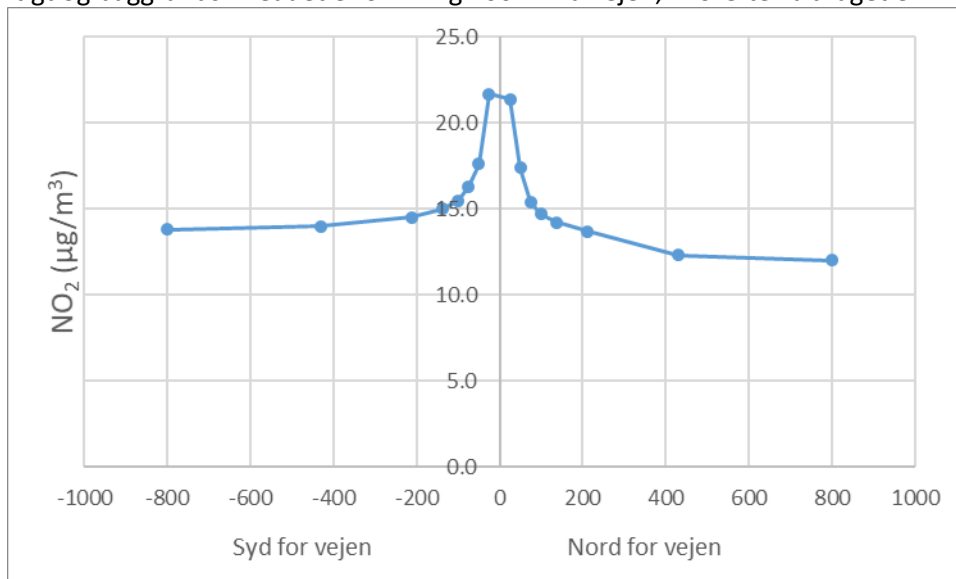
Den allerhøjeste modellerede NO₂ koncentration (34,5 µg/m³) forekommer tæt på Limfjordstunnelen, men det skyldes en meget høj modelleret baggrundskoncentration grundet bidrag fra Aalborg Portland, som sandsynligvis er overestimeret.

I Figur 3.2 er vist et udsnit af bufferzoner med årsmiddelkoncentrationer af NO₂ på en strækning på Køge Bugt Motorvejen, hvor de højeste koncentrationer forekommer. For transekt med de højeste koncentrationer er den højeste koncentration 21,7 µg/m³ og den laveste 12 µg/m³. dvs. at motorvejen bidrager med op til 9,7 µg/m³. Det antages her, at den laveste værdi er meget tæt på baggrundskoncentrationen, hvilket også bekræftes af, at der er meget lille forskel på de beregnede værdier for de to beregningspunkter, som ligger længst væk fra vejen.



Figur 3.2. Beregnede årsmiddelværdier af NO₂ i 2019 på strækning på Køge Bugt Motorvejen.

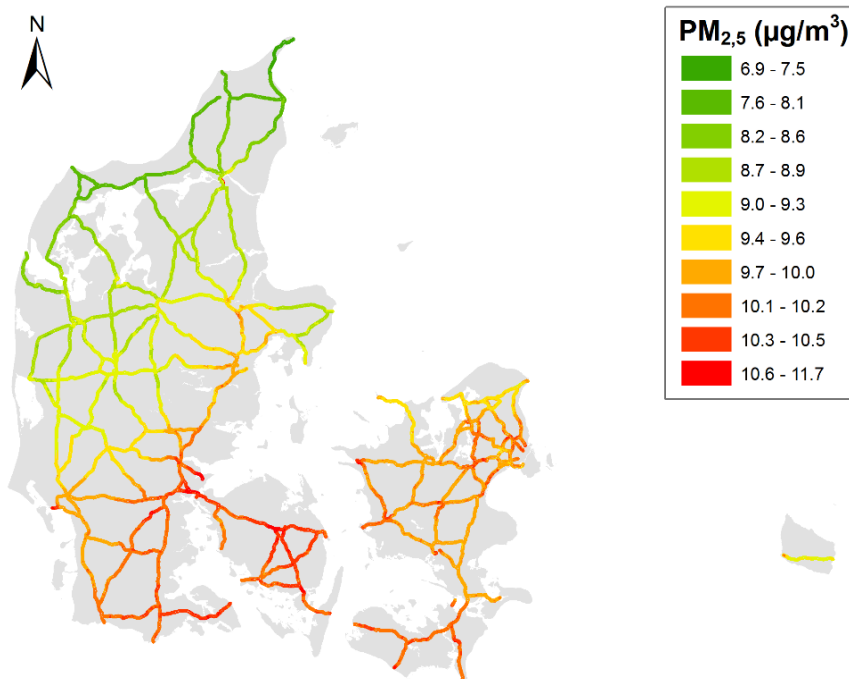
I figur 3.3 er vist de samme data som et transekt, og det fremgår at koncentrationerne er højest tæt på vejen og aftager hurtigt og baggrunds niveauet er omkring 400 m fra vejen, hvorefter bidraget er minimalt.



Figur 3.3. Transekt for beregnede årsmiddelværdier af NO₂ i 2019 på strækning på Køge Bugt Motorvejen. Vejens retning er sydvest-nordøst.

Geografisk beskrivelse for PM_{2.5} og PM₁₀

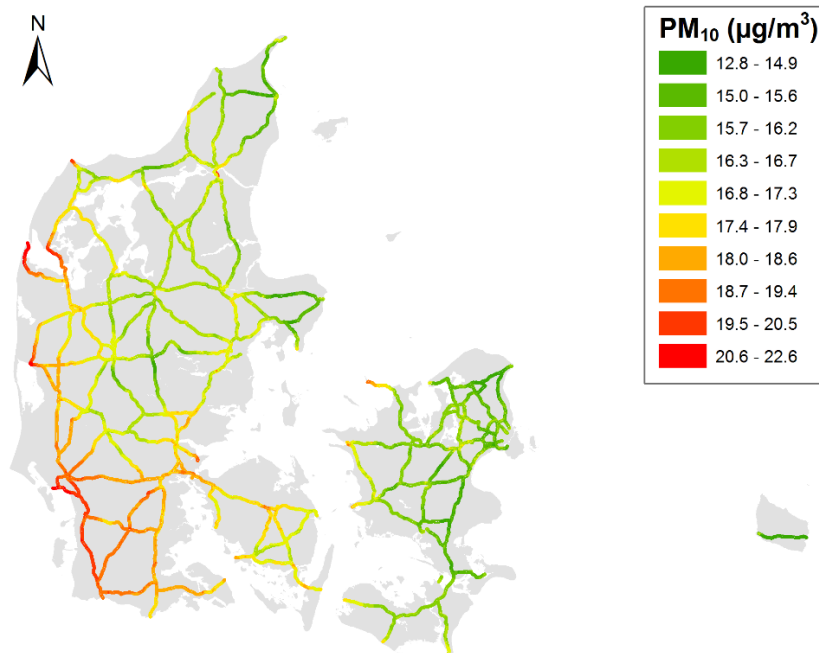
Den geografiske variation af PM_{2.5} i 2019 er vist i Figur 3.4. Den geografiske variation er meget forskellig fra NO₂, idet baggrundsforureningen betyder meget og bidraget fra statsvejnettet betyder mindre. Der ses derfor en tydelig gradient fra syd mod nord, som er bestemt af baggrundsforureningen pga. påvirkningen især Centraleuropa.



Figur 3.4. Geografisk variation af PM_{2.5} som årsmiddelværdi i 2019 langs statsvejnettet.

Årsmiddelværdier af PM_{2.5} på samme strækning på Køge Bugt Motorvejen som i Figur 3.2 har den højeste koncentration på 11,5 µg/m³ og den laveste på 9,9 µg/m³ dvs. at motorvejen bidrager med op til 1,6 µg/m³.

Den geografiske variation af PM₁₀ i 2019 er vist i Figur 3.5. Den geografiske variation minder om variationen for PM_{2.5}, men afviger, da PM₁₀ også er væsentligt influeret af havsprøjt med havsalt, som bidrager på vestvendte kyster og især på vestkysten af Jylland.



Figur 3.5. Geografisk variation af PM₁₀ som årsmiddelværdi i 2019 langs statsvejnettet.

Årsmiddelmålinger af PM₁₀ på samme strækning på Køge Bugt Motorvejen som i Figur 3.2 har den højeste koncentration på 19,9 µg/m³ og den laveste 15,8 µg/m³ dvs. at motorvejen bidrager med op til 4,1 µg/m³.

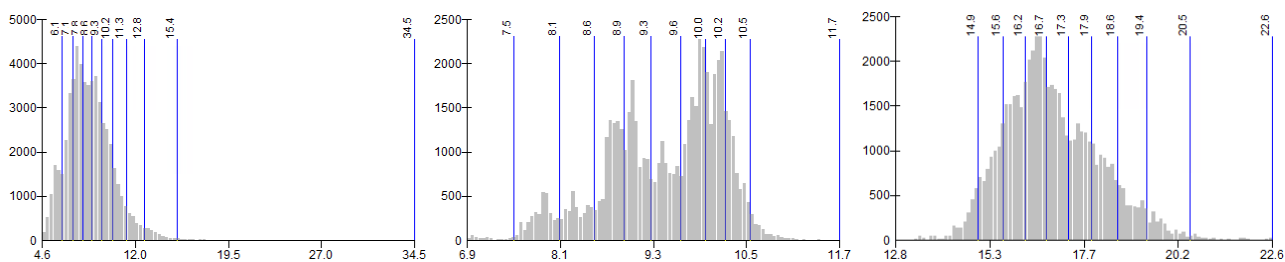
Statistisk beskrivelse

Enkelte beskrivende statistiske parametre er vist i Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Statistiske parametre for årsmiddelmålinger i 2019 for NO₂, PM_{2.5} og PM₁₀ langs statsvejnettet

	NO ₂ µg/m ³	PM _{2.5} µg/m ³	PM ₁₀ µg/m ³
Minimum	5,0	6,9	12,8
Maksimum	34,5	11,7	22,7
Gennemsnit	9,1	9,4	16,9

Den statistiske fordeling af årsmiddelmålinger langs statsvejnettet er vist i Figur 3.6. Der er forskelle mellem fordelingerne afhængig af stofferne. NO₂ fordelingen er domineret af bidraget fra trafikken, mens PM₁₀ og især PM_{2.5} er domineret af bidraget fra den regionale luftforurening og ikke-trafikrelaterede kilder.



Figur 3.6. Statistisk fordeling af årsmiddelmålinger i 2019 for NO₂ (venstre), PM_{2.5} (midte) og PM₁₀ (højre) langs statsvejnettet. Y-aksen er antallet af observationer og x-aksen er koncentrationsniveauet i µg/m³. Blå linjer er baseret på "natural breaks" og svarer til intervalgrænser i figurer, som viser geografiske fordeling.

Sammenligning med grænseværdier og WHO-retningslinjer

I Tabel 3.2 er opsummeret WHO's retningslinjer fra 2005 og 2021 samt EU's grænseværdier fra 2008 og de nye EU-grænseværdier fra 2022/24 gældende fra 2030 og sammenlignet med beregnede koncentrationer på statsvejnettet.

Tabel 3.2. Oversigt over WHO-retningslinjer og EU-grænseværdier for luftkvalitet for årsmiddelværdier af NO₂, PM_{2,5} og PM₁₀ sammenlignet med beregnede koncentrationer langs statsvejnettet i 2019. Enhed µg/m³.

Stof	Midlingstid	WHO 2005	WHO 2021	EU 2008	EU 2022/24	Statsveje	Statsveje	Statsveje
						Min.	Maks.	Gns.
NO ₂	År	20	10	40	20	5	35	8
PM _{2,5}	År	10	5	25	10	7	12	10
PM ₁₀	År	20	15	40	20	13	23	17

Som det fremgår af Tabel 3.2, er EU's grænseværdier væsentlig højere end WHO's retningslinjer i både 2005 og 2021. Det ses også, at WHO har skærpet deres anbefalinger markant fra 2005 til 2021, som skyldes ny viden og bedre dokumentation af luftforureningens helbredsskadelige virkninger. De reviderede grænseværdier fra 2022/24 er væsentligt skærpede i forhold til EU 2008, men stadigvæk væsentligt over WHO 2021.

De reviderede grænseværdier gælder for 2030, men opererer med et såkaldt reduktionskrav herefter. Reduktion af eksponeringskoncentrationen for PM_{2,5} angiver, at eksponeringskoncentrationen skal falde med 10 % over en tiårig periode. Reduktionskravet skal gælde fra 2030 og hvert år fremover. Til eksempel betyder det, at eksponeringskoncentrationen i 2030 (gennemsnit af 2028-2030) skal være 10 % lavere end målt i 2020 (gennemsnit af 2018-2020). Reduktionskravet er gældende, indtil den gennemsnitlige eksponeringskoncentration kommer i overensstemmelse med den foreslåede målsætning for eksponeringskoncentrationen, som for PM_{2,5} er fastlagt til 5 µg/m³ dvs. det samme som WHO 2021. Ligesom for PM_{2,5}, er der et krav om at eksponeringskoncentrationen for NO₂ skal falde med 15 % over en tiårig periode. Reduktionskravet skal også gælde fra 2030 og hvert år fremover indtil den foreslåede målsætning for eksponeringskoncentration er nået, som er 10 µg/m³ svarende til WHO 2021. Der er ikke opstillet reduktionskrav for PM₁₀.

De maksimale beregnede koncentrationer langs med statsvejnettet af de tre stoffer overholder de nuværende EU-grænseværdier, men overskrider de reviderede grænseværdier for de tre stoffer gældende for 2030.

De mindste beregnede koncentrationer overskrider WHO 2021 anbefalingerne for PM_{2,5}, de maksimale koncentrationer overskrider WHO 2021 for alle tre stoffer, og den gennemsnitlige beregnede værdi for PM₁₀ overskrider også WHO 2021.

Sammenligning med tidligere kortlægning fra 2012

I det følgende foretages en sammenligning med den tidligere udførte kortlægning af luftkvaliteten i 2012 langs med statsvejene (Jensen et al., 2015). Sammenligningen er således mellem beregnet luftkvalitet i 2012 og 2019.

Som forventet har den geografiske fordeling af NO₂, PM_{2,5} og PM₁₀ meget store ligheder.

I Tabel 3.3 er sammenlignet statistiske parametre for NO₂, PM_{2,5} og PM₁₀ for hhv. 2012 og 2019.

Tabel 3.3. Statistiske parametre for årsmiddelkoncentrationer i 2012 og 2019 for NO₂, PM_{2,5} og PM₁₀ langs statsvejnettet. Værdier i fed indeholder ikke manglende masse.

	NO ₂ µg/m ³	PM _{2,5} µg/m ³	PM ₁₀ µg/m ³
	2012	2012	2012
Minimum	7	7	11

Maksimum	55	13	20
Gennemsnit	14	9	14
	2019	2019	2019
Minimum	5	7	13
Maksimum	35	12	23
Gennemsnit	8	9	17

Det ses, at de beregnede koncentrationer af NO₂ i gennemsnit er faldet med omkring 40 % fra 2012 til 2019. Dette er i tråd med udviklingen i målte koncentrationer på gademålestationer i Danmark under Det nationale overvågningsprogram for luftkvalitet (Ellermann et al., 2023).

For PM_{2,5} og til dels PM₁₀ er niveauerne næsten ens i både 2012 og 2019. Beregningerne i 2012 indeholdt ikke en korrektion for manglende masse, mens dette er tilfældet for beregningerne for 2019, hvilket betyder, at niveauerne i 2012 burde have været omtrent 33 % højere end vist i Tabel 3.3, hvis der havde været korrigeret for manglende masse i 2012.

Der har også været et fald i både PM_{2,5} og PM₁₀ på målestationerne fra 2012 til 2019 (Nordstrøm et al., 2024).

3.2 Berørte boliger og befolkningseksponering

Berørte boliger

Alle boliger, og øvrige bygninger med boliglignende ophold, indgår i antallet af støjbelastede boliger, og indgår derfor også i opgørelsen af boliger udsat for luftforurening. På samme måde som for støj indgår alle boliger beliggende inden for en afstand af omkring 1.000 m fra statsvejene. Boligoplysninger er baseret på et udtræk fra Bygnings- og Boligregisteret (BBR), og leveret af Vejdirektoratet i oktober 2021, og er samme datasæt, som indgik i Vejdirektoratets landsdækkende EU-støjkortlægning. I Tabel 3.4 er vist de boligtyper som indgår. Bemærk at kode 130 og 520 er blevet underopdelt og med tiden udfases. De er medtaget her, da de stadigvæk indgår i datasættet.

Tabel 3.4. Boligtyper som indgår i antal støj- og luftforureningsbelastede boliger

Anvendelses kode i BBR	Boligtype	Indgår i antal støj- og luftforureningsbelastede boliger	Indgår ikke
110	Stuehus	X	
120	Parcelhus	X	
121	Sammenbygget enfamiliehus	X	
122	Fritliggende enfamiliehus i tæt-lav bebyggelse	X	
130	Række-, kæde-, eller dobbelthus (udfases)	X	
131	Række-, kæde-, og klyngehuse	X	
132	Dobelthus	X	
140	Etagebolig	X	
150	Kollegium	X	
160	Døgninstitution	X	
190	And. helårsbolig	X	
510	Sommerhus	X	
520	Enhed i feriekoloni, vandrehjem o.l. (udfases)		X
521	Feriecenter, center til campingplads mv.		X
522	Ferielejlighed til erhvervsmæssig udlejning		X
523	Ferielejlighed til eget brug		X
529	Anden enhed til ferieformål		X
540	Kolonihavehus		X
590	Anden fritidsbygning		X

Da der for en given adresse kan være flere boligenheder (fx ved etageboliger) tælles antal boliger som antal boligenheder. En adresse er her kommune-kode-vejkode-hus nr. dvs. uden etage- og sidedørsoplysninger, da vi beregner luftforureningen på adressen i jordniveau.

I BBR datasættet fra Vejdirektoratet var der omkring 3,5 % af adresserne, som lå mere end 1.000 m fra vejnettet. Disse blev slettet. Endvidere var det ikke alle adresser i BBR, som fik tilknyttet befolkningsdata fx fordi det var sommerhuse eller lignende. Det resulterede i 496.978 adresser, som havde i alt 727.320 boligenheder.

Berørte mennesker

Med udgangspunkt i CPR data beregnes antallet af mennesker på adresser inden for 1.000 m af statsvejene. DCE har fået godkendt benyttelse af CPR data til nærværende projekt, og det er anmeldt. Da CPR data er følsomme oplysninger vises ikke antal mennesker, køn eller alder på fx enkelte adresser, således det potentielt kunne være muligt at identificere enkeltpersoner. CPR data er leveret den 23.3.2022 af Forskerservice under Sundhedsdatastyrelsen. Oplysninger vises kun statistisk, som antal personer, og køn og alder analyseres ikke.

CPR data er geokodet dvs. koordinater for adressen er tilknyttet via nøglen kommune-kode-vejkode-hus nr. fra adresseregisteret.

Herefter er det geokodede CPR data knyttet til BBR via nøglen kommune-kode-vejkode-hus nr.

Derefter er beregnede koncentrationer på bufferzoner knyttet til BBR, således at der opnås et datasæt, som både indeholder oplysninger om BBR, CPR og luftkvalitet.

Ovenstående er gennemført ved brug af softwaret R og GIS.

Der indgår således 496.978 adresser fordelt på 727.320 boligenheder med tilknyttede befolkningsdata i alt 1.493.386.

I Tabel 3.5 opsummeret antal adresser, boligenheder, personer samt det gennemsnitlige antal personer per boligenhed.

Tabel 3.5. Antal adresser, boliger og mennesker inden for 1.000 m af statsvejnettet

Anvendelseskode i BBR	Boligtype	Adresser	Boligenheder	Personer i alt	Personer per bolig
110	Stuehus	17.079	17.368	45.433	2,6
120	Parcelhus	287.375	288.146	734.214	2,5
121	Sammenbygget enfamiliehus	94	96	240	2,5
122	Fritliggende enfamiliehus i tæt-lav bebyggelse ⁷		7	13	1,9
130	Række-, kæde-, eller dobbelthus (udfases)	96.426	101.465	184.034	1,8
131	Række-, kæde-, og klyngehuse	22.068	23.465	47.370	2,0
132	Doppelthus	6.177	6.212	13.227	2,1
140	Etagebolig	62.521	274.031	448.400	1,6
150	Kollegium	1.848	10.493	11.274	1,1
160	Døgninstitution	375	2.176	3.006	1,4
190	And. helårsbolig	832	1.656	2.581	1,6
510	Sommerhus	2.176	2.205	3.594	1,6
		496.978	727.320	1.493.386	2,1

Befolkningseksposering og boligtyper

I Tabel 3.6 er vist den gennemsnitlige årsmiddelkoncentration af NO₂, PM_{2,5} og PM₁₀ i 2019 på adresser med forskellige boligtyper.

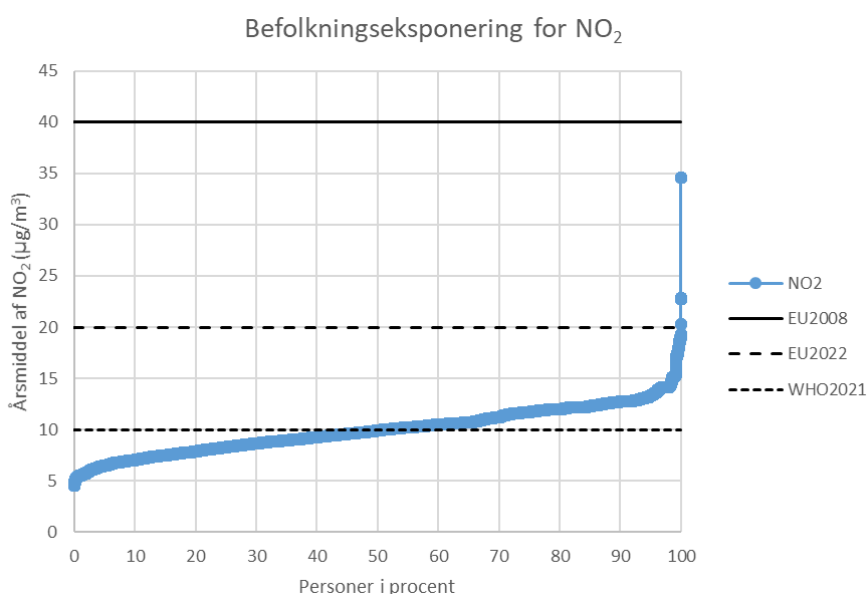
Tabel 3.6. Gennemsnitlige årsmiddelkoncentration af NO₂, PM_{2,5} og PM₁₀ i 2019 på adresser med forskellige boligtyper inden for 1.000 m af statsvejnettet.

Anvendelses-kode i BBR	Boligtype	NO ₂ (µg/m ³)	PM _{2,5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)
110	Stuehus	8,1	9,4	16,8
120	Parcelhus	9,2	9,7	16,9
121	Sammenbygget enfamiliehus	8,7	9,6	16,9
122	Fritliggende enfamiliehus i tæt-lav bebyggelse	7,9	9,6	18,0
130	Række-, kæde-, eller dobbelthus (udfases)	9,8	9,8	16,7
131	Række-, kæde-, og klyngehuse	10,3	9,8	16,5
132	Doppelthus	9,7	9,9	16,6
140	Etagebolig	10,3	9,8	16,6
150	Kollegium	11,2	9,9	16,7
160	Døgninstitution	9,3	9,7	16,9
190	And. helårsbolig	8,6	9,5	16,8
510	Sommerhus	8,4	9,5	16,2

Som det ses af Tabel 3.6 er der i gennemsnit lidt højere koncentrationer for fx etageboliger, kollegier, tæt-lav boliger i forhold til fx stuehuse og parcelhuse, som kan skyldes deres placering i byområder, hvor disse typer af boliger ligger i tættere beboet områder med større baggrundskoncentration og måske også tættere på en trafikeret statsvej.

Befolkningseksposering i forhold til grænseværdier og WHO-retningslinjer

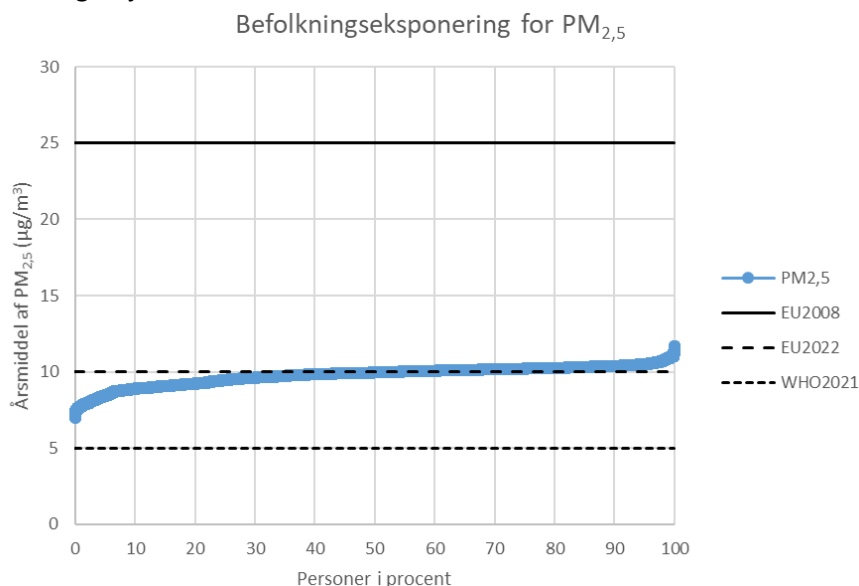
I Figur 3.7 er vist andelen af personer i procent, som bor på adresser i op til 1.000 m fra statsvejnettet, og tilhørende koncentrationsniveauer for NO₂ i 2019 på adresserne.



Figur 3.7 Befolkningseksposering for NO₂ i 2019 sammenlignet med grænseværdier og WHO-retningslinjer.

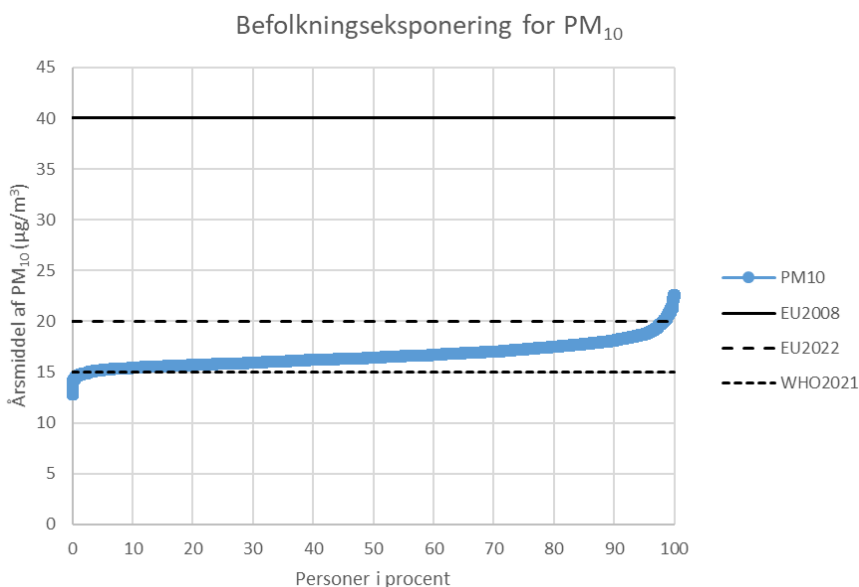
Som det fremgår af Figur 3.7 bor alle mennesker langs statsvejnettet på adresser, som er under grænseværdien for NO₂. Kun godt 500 personer (0,04 %) bor på adresser, hvor den reviderede EU grænseværdi gældende i 2030 overskrides. Til gengæld bor omkring 49 % på adresser, som overskrider WHO-retningslinjer fra 2021.

I Figur 3.8 er vist befolkningseksposeringen for PM_{2,5}. Som det fremgår bor alle mennesker på adresser langs statsvejnettet, som er under grænseværdien for PM_{2,5}. Til gengæld bor omkring 49 % på adresser med PM_{2,5}-koncentrationer, som overskrider den reviderede EU grænseværdi gældende i 2030, og alle adresser overskrider WHO-retningslinjer fra 2021.



Figur 3.8. Befolkningseksposering for PM_{2,5} i 2019 sammenlignet med grænseværdier og WHO-retningslinjer.

I Figur 3.9 er vist befolkningseksposeringen for PM₁₀. Som det fremgår bor alle mennesker på adresser langs statsvejnettet, som er under grænseværdien for PM₁₀, men omkring 2% bor på adresser med PM₁₀-koncentrationer, som overskrider den reviderede EU-grænseværdi gældende i 2030, og omkring 97 % bor på adresser, som overskrider WHO-retningslinjer fra 2021.



Figur 3.9. Befolkningseksposering for PM₁₀ i 2019 sammenlignet med grænseværdier og WHO-retningslinjer.

Sammenligning med andre datasæt for landsdækkende luftkvalitetskortlægning

Nærværende studie omfatter kun statsvejnettet, da studiet var på opdrag af Vejdirektoratet, som har ansvaret for statsvejnettet. De fleste statsveje er motor- og landeveje i det åbne land med lav bebyggelsestæthed langs vejene, men der er også statsveje som fx Motorring 3 vest om København med betydelig bebyggelse langs vejene. Studiet viste, at der bor omkring 1,5 million mennesker inden for 1.000 m af statsvejnettet.

Spredningsforholdene langs veje i åbent terræn giver lavere koncentrationer for samme trafikmængde i forhold til bygader med tæt randbebyggelse, idet bygningerne begrænser spredningen og øger opholdstiden, hvilket giver højere koncentrationer for samme trafikmængde.

I anden sammenhæng er der foretaget en kortlægning af luftkvaliteten ved alle adresser i Danmark præsenteret i datasættet Luften på din vej 2.0 (Jensen et al., 2021). I dette datasæt er luftkvaliteten på alle adresser i Danmark beregnet med samme baggrundsmodeller som i nærværende studie, men trafikens bidrag i bygaderne er beregnet med gadeluftkvalitetsmodellen OSPM. Luftkvaliteten er beregnet for 2019 dvs. samme årstal som nærværende studie.

På adresser i Luften på din vej 2.0 er der beregnet 27 overskridelser af grænseværdien på $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for NO_2 , hvor den maksimale beregnede værdi er på $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$. På adresser langs statsvejnettet er den maksimale værdi $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, og den anden højeste værdi er $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dvs. som forventet lavere end for adresser langs bygader.

For $\text{PM}_{2,5}$ ses et tilsvarende billede med lavere koncentrationer på adresser langs statsvejnettet i forhold til bygader. På adresser i Luften på din vej 2.0 er beregnet $\text{PM}_{2,5}$ -koncentrationer på omkring 6 til $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En meget stor del af adresserne ligger i koncentrationsintervallet fra 9 til $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$. På adresser langs statsvejnettet er beregnet $\text{PM}_{2,5}$ -koncentrationer fra omkring 7 til $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Et tilsvarende billede ses for PM_{10} . På adresser i Luften på din vej 2.0 er beregnet PM_{10} -koncentrationer fra omkring 12 til $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ med hovedparten af koncentrationerne i intervallet 16 til $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$. På adresser langs statsvejnettet er beregnet PM_{10} -koncentrationer fra omkring 13 til $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Luften på din vej 2.0 er baseret på Landstrafikmodellen fra DTU. Trafikdata repræsenterer 2020. Vejnettet i Landstrafikmodellen dækker alle større veje og således alle statsveje samt større kommunale veje. Vejnettet i nærværende studie er baseret på et dataset fra vejman.dk, som omfatter alle statsveje, og repræsenterer trafikdata fra 2021. Der kan således forventes små forskelle i trafikmængder pga. de forskellige årstal for Landstrafikmodellen og vejman.dk, men dette har minimal indflydelse på sammenligningen af beregnede koncentrationsniveauer, idet andre kilder end trafik også spiller en betydelig rolle.

4. Konklusion

Kortlægning af luftkvaliteten og befolkningens eksponering er gennemført langs statsvejene i hele Danmark i 2019 med en forbedret version af OML-Highway modellen med tilvejebringelse af nødvendigt input data. I luftkvalitetskortlægningen beregnes på alle adresser årsmiddelværdien af NO_2 , $\text{PM}_{2,5}$ og PM_{10} , som er udvalgte luftforurenende stoffer relateret til helbredseffekter. Luftkvalitet og eksponering er sammenlignet med nuværende og reviderede EU-grænseværdier samt WHO's retningslinjer for luftkvalitet. Kortlægningen viser, at der i en afstand af 1.000 m fra statsvejnettet, bor omkring 1,5 million mennesker i omkring $\frac{3}{4}$ million boligheder fordelt på omkring halv million adresser. Alle mennesker langs statsvejnettet bor på adresser, som er under grænseværdien for NO_2 . Kun godt 500 personer (0,04 %) bor på adresser, hvor den reviderede EU-grænseværdi gældende i 2030 overskrides. Til gengæld bor omkring 49 % på adresser, som overskrider WHO-retningslinjer fra 2021. For $\text{PM}_{2,5}$ bor alle under grænseværdien, men omkring 49 % bor på adresser med $\text{PM}_{2,5}$ -koncentrationer, som overskrider den reviderede EU-grænseværdi gældende i 2030, og alle adresser overskrider WHO-retningslinjer fra 2021. For PM_{10} bor alle mennesker på adresser under

grænseværdien, men omkring 2 % bor på adresser med PM₁₀-koncentrationer, som overskrider den reviderede EU-grænseværdi gældende i 2030, og omkring 97 % bor på adresser, som overskrider WHO-retningslinjer fra 2021.

Det maksimale bidrag fra statsvejene forekommer på en strækning på Køge Bugt Motorvejen, som er Danmarks mest trafikerede motorvej. For NO₂ er den højeste koncentration 21,7 µg/m³ tæt på motorvejen og den laveste 12 µg/m³ i en afstand af 800 m, hvor baggrundsniveauet er nået dvs. at motorvejen bidrager med op til 9,7 µg/m³. For PM_{2,5} på samme strækning er den højeste koncentration på 11,5 µg/m³ og den laveste på 9,9 µg/m³ dvs. at motorvejen bidrager med op til 1,6 µg/m³. Dette er relativt mindre end for NO₂, da baggrundsbidraget er stort for PM_{2,5}. PM₁₀ på samme strækning har den højeste koncentration på 19,9 µg/m³ og den laveste 15,8 µg/m³ dvs. at motorvejen bidrager med op til 4,1 µg/m³. Luftkvalitetsniveauerne og befolkningseksposering langs statsvejene er således en kombination af baggrundsbidraget og statsvejenes bidrag.

Koncentrationerne langs statsvejene er faldet fra forrige kortlægning i 2012 til 2019, hvilket også er i overensstemmelse med målinger langs trafikerede byveje i det nationale overvågningsprogram for luftkvalitet.

Taksigelse

Vejdirektoratet finansierede projektet, og har stillet data til rådighed fra vejman.dk, INREX og BBR. CPR-data er leveret af Forskerservice under Sundhedsdatastyrelsen.

Referencer

Berger J., Walker S-E., Denby B., Berkowicz R., Løfstrøm P., Ketznel M., Härkönen J., Nikmo J. and Karppinen A., 2010. Evaluation and inter-comparison of open road line source models currently in use in the Nordic countries. *Boreal Environment Research*. Available as preprint at www.borenv.net/BER/pdfs/preprints/Berger.pdf. ISSN 1797-2469 (online), ISSN 1239-6095.

Berkowicz, R., 2000a. OSPM - A parameterised street pollution model, *Environmental Monitoring and Assessment*, Volume 65, Issue 1/2, pp. 323-331.

Berkowicz, R., 2000b: A simple model for urban background pollution, *Environmental Monitoring and Assessment* 2000, 65, 259-267. doi: 10.1023/A:1006466025186.

Brandt, J., J. H. Christensen, L. M. Frohn and R Berkowicz, 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, 2003.

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

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

Düring, I., Bächlin, W., Ketznel, M., Baum, A., Friedrich, U., Wurzler, S., 2011. A new simplified NO/NO₂ conversion model under consideration of direct NO₂-emissions *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 20, No. 1, 067-073 (February 2011) Open Access Article © by Gebrüder Borntraeger 2011 (published online).

EMEP/EEA, 2019. Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, prepared by the UNECE/EMEP Task Force on Emissions Inventories and Projections (TFEIP). Available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>.

Ellermann, T., Jensen, S. S., Ketznel, M., Løfstrøm, P., & Massling, A., 2009. Measurements of air pollution from a Danish highway. National Environmental Research Institute, Aarhus University. Research Notes from NERI Nr. 254. <http://www.dmu.dk/Pub/AR254.pdf>

EU, 2008. EUROPA-PARLAMENTETS OG RÅDETS DIREKTIV 2008/50/EF af 21. maj 2008 om luftkvaliteten og renere luft i Europa.

EU, 2024. DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on ambient air quality and cleaner air for Europe (recast). 2 October 2024.

Jensen, S.S., Løfstrøm, P., Berkowicz, R., Olesen, H.R., Frydendal, J., Fuglsang, K., Hummelshøj, P., 2004. Luftkvalitet langs motorveje - Målekampagne og modelberegninger. Danmarks Miljøundersøgelser, 67 s. – Faglig rapport fra DMU nr. 522. http://www2.dmu.dk/1_Viden/2_Publikationer/3_Fagrapporter/rapporter/FR522_2udgave.pdf.

Jensen, S.S., Løfstrøm, P., Berkowicz, R., Madsen, I., 2005a. Kortlægning af luftkvalitet langs motorveje. Udarbejdet af Danmarks Miljøundersøgelser for Roskilde Amt. Roskilde Amt. 45 s. Elektronisk rapport www.ra.dk.

Jensen, S.S., Løfstrøm, P., Berkowicz, R., Olesen, H.R., Frydendal, J., Madsen, I.L., Fuglsang, K., Hummelshøj, P., 2005b. Kortlægning af luftkvalitet langs motorveje. Trafikdage på Aalborg Universitet 22.-23. august 2005. www.trafikdage.dk/td/papers/papers05/Trafikdage-2005-419.pdf.

Jensen, S.S., Becker, T., Ketznel, M., Løfstrøm, P., Olesen, H.R., Lorentz, H., 2010a. OML-Highway within the framework of SELMAGIS. Final Report. National Environmental Research Institute, Aarhus University, Denmark, 26 p, NERI Technical Report No. 771. <http://www.dmu.dk/Pub/FR771.pdf>.

Jensen, S.S., Ketznel, M., Becker, T., Løfstrøm, P., Olesen, H.R., Lorentz, H., Michelsen, L.N., Fryd, J., 2010b. OML-Highway – en ny brugervenlig GIS-baseret luftkvalitetsmodel for motorveje, landeveje og andre veje i åbent terræn. Trafikdage på Aalborg Universitet, 23.-24. august 2010. www.trafikdage.dk.

Jensen, S.S., Ketznel, M., Becker, T., Løfstrøm, P., Olesen, H.R., 2011a. Luftkvalitetsvurdering af udvidelse af motorvej syd om Odense. VVM redegørelse. Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet. <http://www.dmu.dk/Pub/FR825.pdf>.

Jensen, S.S., Ketznel, M., Becker, T., Hertel, O., Løfstrøm, P., Olesen, H.R., 2011b. Luftkvalitetsvurdering for 3. Limfjordsforbindelse. VVM redegørelse. Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet. <http://www.dmu.dk/Pub/FR824.pdf>.

Jensen, S.S., Ketznel, M., Becker, T., Hertel, O., 2011c. Luftkvalitetsvurdering for rute 26 Viborg-Aarhus. VVM redegørelse. 72 s. DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet. Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 12. <http://www2.dmu.dk/Pub/SR12.pdf>.

Jensen, S.S., Ketznel, M., Becker, T., Løfstrøm, P., Hertel, O., Olesen, H.R., Lorentz, H., 2012. OML-Highway → a GIS-based road source model for air quality assessment → applications in EIA. 8th International Conference on Air Quality – Science and Application 2012, Athens.

Jensen, S.S., Ketznel, M., Hertel, O., Becker, T., Løfstrøm, P., Olesen, H.R., 2013. Vejledning i luftkvalitetsvurdering af motorveje. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. Vejdirektoratets rapportserie RAPPORT 455 – 2013. 67 s.

Jensen, S.S., Im, U., Ketznel, M., Løfstrøm, P. & Brandt, J., 2015. Kortlægning af luftkvalitet langs motor- og landeveje i Danmark. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 41 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 154. <http://dce2.au.dk/pub/SR154.pdf>

Jensen, S.S., Ketznel, M., Im, U., Løfstrøm, P., Poulsen, M.B., Monies, C., Ellermann, T., 2017. Validering af luftkvalitetsmodellen OML-Highway. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 49 s. - Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 240 <http://dce2.au.dk/pub/SR240.pdf>

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

Jensen, S.S., Ketznel, M., Khan, J., 2023. Kortlægning af luftkvalitet langs statsvejene i Danmark. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 51 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 537. <http://dce2.au.dk/pub/SR537.pdf>

Kakosimos K.E., Hertel O., Ketzler M. and Berkowicz R., 2011. "Operational Street Pollution Model (OSPM) - a review of performed validation studies, and future prospects", Environmental Chemistry, 7, 485-503. ([doi-Link](#))

Løfstrøm, P., 2020. Forbedring af OML-Highway. Marts 2020. Intern notat udarbejdet af Aarhus Universitet.

Nordstrøm, C., Ellermann, T., Brandt, J., Christensen, J., Ketzler, M., Massling, A., Bossi, R., Frohn, L.M., Geels, C., Solvang Jensen, S., Nielsen, O.-K., Winther, M., Poulsen, M.B., Sørensen, M. B., Skou Andersen, M., og Sigsgaard, T., 2024. Luftkvalitet 2023. Status for den nationale luftkvalitetsovervågning. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 158 s. - Videnskabelig rapport nr. 627.

Olesen, H.R., Løfstrøm, P., Berkowicz, R. and Jensen, A.B., 1992. An improved dispersion model for regulatory use - the OML model. In: Air Pollution Modelling and its Application IX, H. van Dop and G. Kallos (eds.). Plenum Press, New York.

Olesen, H.R., Berkowicz, R.B, Løfstrøm, P., 2007. OML: Review of model formulation. National Environmental Research Institute, Denmark. 130pp. -NERI Technical Report No. 609, <http://www.dmu.dk/Pub/FR609>.

Olesen, H.R., Ketzler, M., Jensen, S.S., Løfstrøm, P., Im, U., Becker, T., 2015. User's Guide to OML-Highway. A tool for air pollution assessments along highways. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 63 pp. Technical Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy No. 59 <http://dce2.au.dk/pub/TR59.pdf>

Plejdstrup, 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>

R Core Team, 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>

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

Wang, F., Ketzler, M., Ellermann, T., Wählén, P., Jensen, S. S., Fang, D., and Massling, A., 2010. Particle number, particle mass and NO_x emission factors at a highway and an urban street in Copenhagen, Atmos. Chem. and Phys., 10, 2745–2764.

Vejdirektoratet, 2022. Statsvejnettet. Oversigt over tilstand og udvikling. Rapport 615. Oktober 2022. ISBN (TRYK): 978-87-7595-012-6.

WHO, 2005. Air Quality Guidelines. Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide.

WHO, 2021. WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.