



LUFTEN PÅ DIN VEJ 2.0

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 445

2021



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

LUFTEN PÅ DIN VEJ 2.0

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 445

2021

Steen Solvang Jensen
Matthias Ketzel
Jibran Khan
Victor H. Valencia
Jørgen Brandt
Jesper H. Christensen
Lise M. Frohn
Ole-Kenneth Nielsen
Marlene Schmidt Plejdrup
Thomas Ellermann

Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 445
Titel:	Luften på din vej 2.0
Kategori:	Videnskabelig rapport
Forfattere:	Steen Solvang Jensen, Matthias Ketzel, Jibran Khan, Victor H. Valencia, Jørgen Brandt, Jesper H. Christensen, Lise M. Frohn, Ole-Kenneth Nielsen, Marlene Schmidt Plejdrup, Thomas Ellermann
Institution:	Institut for Miljøvidenskab (ENVS), Aarhus Universitet, Roskilde
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	26. maj 2021
Redaktion afsluttet:	Maj 2021
Faglig kommentering:	Per Løfstrøm, Institut for Miljøvidenskab
Kvalitetssikring:	Vibeke Vestergaard Nielsen, DCE
Finansiel støtte:	Miljøministeriet.
Bedes citeret:	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
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Rapporten beskriver Luften på din vej 2.0, som er en opdateret version med beregnet luftkvalitetsdata for 2019, mod tidligere 2012 i version 1.0. Modelsystemet anvendt til beregning af luftkvaliteten i 2012 og 2019 på alle adresser i Danmark og de anvendte inputdata er bekræftet med vægt på 2019 data. Den beregnede luftkvalitet i 2019 er illustreret på kort og beskrevet statistisk. Der er lavet en detaljeret analyse af beregnede indikative overskridelser af grænseværdien for NO ₂ i 2019, og udviklingen siden 2012 i antal overskridelser er også vist. Beregningerne er endvidere sammenlignet med målinger i 2019 fra det nationale overvågningsprogram for luftkvalitet for at vurdere usikkerheden på modelberegningerne. Opdateringen for 2019 omfatter NO ₂ (kvælstofdioxid), PM _{2,5} (partikler under 2,5 mikrometer), PM ₁₀ (partikler under 10 mikrometer), og som noget nyt indgår tillige BC (Black carbon) og partikelantal.
Emneord:	Luftkvalitet, kortlægning, modelberegninger, NO ₂ , PM _{2,5} , PM ₁₀ , BC og partikelantal.
Hjemmeside, Luften på din vej:	https://luftenpaadinvej.au.dk
Layout:	Majbritt Ulrich, Institut for Miljøvidenskab
Foto forside:	Colourbox
ISBN:	978-87-7156-597-3
ISSN (elektronisk):	2244-9981
Sideantal:	62
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som http://dce2.au.dk/pub/SR445.pdf

Indhold

Indledning	5
1 Sammenfatning	6
1.1 Baggrund og formål	6
1.2 Undersøgelsen	7
1.3 Hovedkonklusioner	8
2 Summary in English	13
2.1 Background and purpose	13
2.2 Methodology	14
2.3 Main conclusions	15
3 Anvendte modelsystem og inputdata	20
3.1 DEHM	21
3.2 UBM	21
3.3 OSPM	22
3.4 AirGIS	22
3.5 Meteorologiske data	22
3.6 Danske og udenlandske emissioner	23
3.7 Trafikdata	24
3.8 Sammenligning mellem modelleret og talt trafikdata	28
3.9 Begrænsninger	30
4 Validering af modelberegninger i 2019	31
4.1 Sammenligning mellem målinger og modelberegninger i overvågningsprogrammet og LPDV i 2019	31
5 Modelleret luftkvalitet i 2019	36
5.1 Geografisk variation af NO ₂	36
5.2 Geografisk variation af PM _{2,5}	38
5.3 Geografisk variation af PM ₁₀	39
5.4 Geografisk variation af BC	41
5.5 Geografisk variation af partikelantal	42
5.6 Statistisk variation for de fem luftforurenende stoffer	43
6 Indikative overskridelser af NO₂-grænseværdien i 2019	48
6.1 Indikative NO ₂ -overskridelser i København i 2019	48
6.2 Indikative NO ₂ -overskridelser i Aarhus i 2019	50
6.3 Udvikling i indikative NO ₂ -overskridelser fra 2012 til 2019	52
Referencer	54
Bilag 1 Ordliste	58
Bilag 2 Generel beskrivelse af BC og partikelantal	59
BC og partikelantal som del af partikelforurening	59
Måling af EC i luften	61
Måling af partikelantal i luften	62

Indledning

”Luften på din vej” er et digitalt Danmarkskort over luftkvaliteten, som er tilgængeligt for alle. Formålet med luftkvalitetskortet er at illustrere den geografiske variation af luftkvalitet i Danmark for udvalgte helbredsrelaterede luftforurenende stoffer. Det er et interaktivt kort, som viser, hvordan luftkvaliteten fordeler sig geografisk i hele Danmark, men også på hver enkelt adresse. Koncentrationen af en række helbredsskadelige stoffer er beregnet med luftkvalitetsmodeller, og luftkvalitetskortet kan ses på hjemmesiden <http://luftenpaadinvej.au.dk>. Luften på din vej er forkortet LPDV.

Denne rapport beskriver Luften på din vej 2.0, som er en opdateret version med beregnet luftkvalitetsdata for 2019, hvor tidligere version 1.0 havde beregnet data for 2012.

Den første version af Luften på din vej blev lanceret i 2016 og indeholdt beregnede årsmiddelkoncentrationer for 2012 af NO₂ (kvælstofdioxid), PM_{2,5} (partikler under 2,5 mikrometer) og PM₁₀ (partikler under 10 mikrometer). I Luften på din vej 2.0 med beregninger for 2019 indgår som noget nyt tillige BC (Black Carbon) og partikelantal.

Kapital 1 er en sammenfatning på dansk, og kapitel 2 en sammenfatning på engelsk.

Kapital 3 beskriver det anvendte modelsystem til beregning af luftkvalitet og tilhørende inputdata. Luftkvalitetsmodellerne er udviklet af Aarhus Universitet. Der lægges særligt vægt på trafikinput på vejnettet, som er en forudsætning for at kunne foretage luftkvalitetsberegninger af gadekoncentrationer på adresseniveau. Trafikdata er blevet opdateret med nye data fra Landstrafikmodellen leveret af DTU, og nyere data om rejsehastigheder fra Vejdirektoratet.

Kapital 4 beskriver usikkerheder og begrænsninger for det beregnede luftkvalitetsdata. Beregningerne er sammenlignet med målinger fra det nationale overvågningsprogram for luftkvalitet for at vurdere usikkerheden på modelberegningerne i 2019, og begrænsninger i anvendelse af beregningsresultaterne er kort diskuteret for forskellige situationer og kilder.

I kapitel 5 beskrives den beregnede luftkvalitet i 2019, som er illustreret på kort og beskrevet statistisk.

I kapitel 6 beskrives en detaljeret analyse af beregnede indikative overskridelser af grænseværdien for NO₂ i 2019, og udviklingen siden 2012 i antal overskridelser er også beskrevet.

Bilag 1 er en ordliste over anvendte forkortelser for forskellige partikelbegreber og gasser.

Bilag 2 er en generel beskrivelse af BC og partikelantal.

1 Sammenfatning

1.1 Baggrund og formål

Luften på din vej er et digitalt Danmarks-kort over luftkvaliteten, som er tilgængeligt for alle og som angiver luftkvaliteten for alle adresser i Danmark. Formålet med luftkvalitetskortet er at illustrere den geografiske variation af luftkvalitet i Danmark for udvalgte helbredsrelaterede luftforurenende stoffer. DCE har opdateret luftkvalitetsdata på Luften på din vej, så Danmarks-kortet dækker 2019 og har samtidigt udvidet antallet af luftforureningskomponenter. Den nye opdaterede version betegnes Luften på din vej 2.0. Formålet med denne rapport er at beskrive Luften på din vej 2.0.

Luften på din vej er et interaktivt kort, som viser, hvordan luftkvaliteten fordeles sig geografisk i hele Danmark, men også på hver enkelt adresse. Koncentrationen af en række helbredsskadelige stoffer er beregnet med luftkvalitetsmodeller, og luftkvalitetskortet kan ses på hjemmesiden <http://luften-paadinvej.au.dk>. Brugerfladen er både på dansk og engelsk.

Den første version af Luften på din vej (nu kaldet 1.0) blev lanceret i 2016 og indeholdt beregnede årsmiddelkoncentrationer for 2012 af NO₂ (kvælstofdioxid), PM_{2,5} (partikler under 2,5 mikrometer) og PM₁₀ (partikler under 10 mikrometer). I Luften på din vej 2.0 med beregninger for 2019 indgår som noget nyt tillige BC (Black Carbon) og partikelantal. Partikelantal er tilnærmelsesvis det samme som ultrafine partikler.

Luften på din vej kan give et fingerpeg om eventuelle overskridelser af grænseværdier for luftkvalitet, men grundet den større usikkerhed på modelberegninger er officielle udmeldinger primært baseret på målinger fra målestationer under Det nationale overvågningsprogram for luftkvalitet, og modeller er et supplerende vurderingsværktøj. Luften på din vej 2.0 indgår i dag i overvågningsprogrammet som et supplerende værktøj til vurdering af luftkvaliteten i Danmark. Vi betegner modellerede overskridelser som indikative overskridelser.

DCE ved Aarhus Universitet har tilvejebragt luftkvalitetsdata på et fagligt forsvarligt grundlag med en beskrivelse af tilhørende usikkerheder. DCE hæfter ikke for fejlinformation som følge af fejl i data ligesom DCE ikke kan gøres ansvarlig for tab eller skader, hverken direkte eller indirekte, som følge af brugen af luftkvalitetsdata. Data har udelukkende vejledende karakter. Data kan alene anvendes til at give brugeren en overordnet vurdering. Det anbefales derfor enhver bruger at indhente yderligere informationer, før brugeren fx iværksætter tiltag på baggrund af forventninger om luftforureningen.

Mulige anvendelser af Luften på din vej er:

- Vurdering af luftkvaliteten, hvor du bor, arbejder eller uddanner dig i forhold til andre områder
- Vurdering af luftkvaliteten på institutioner for børn, unge og ældre
- Vurdering af luftkvaliteten på forskellige steder til støtte i en flyttesituation
- Få et fingerpeg om luftkvaliteten i forhold til grænseværdier
- Undervisere kan bruge luftkvalitetskortet i undervisningssammenhæng

1.2 Undersøgelsen

Modelsystem

Luftkvaliteten er beregnet med luftkvalitetsmodeller. Disse modeller beskriver matematisk de elementer som indgår. Det drejer sig om emissionen af luftforurening fra forskellige kilder, spredningen heraf, stoffernes kemiske omdannelse og afsætning, indflydelse fra bygninger mv., samt de meteorologiske forhold.

Luftkvaliteten er beregnet med et modelsystem, som betegnes DEHM/UBM/AirGIS og er udviklet af Aarhus Universitet over en længere årrække.

Modelsystemet består af en regional langtransportmodel (DEHM), en baggrundsmodel med høj opløsning (UBM) og en gadeluftkvalitetsmodel (OSPM) med tilhørende meteorologi og emissionsdata mv.:

- Meteorologiske data, som indgår i alle modellerne, er baseret på den meteorologiske model WRF (Weather, Research and Forecasting).
- DEHM i kombination med UBM beregner baggrundskoncentrationen.
- OSPM beregner gadekoncentrationer, hvor baggrundskoncentrationer også indgår.
- AirGIS anvendes til generering af input om trafik og gadegeometri til OSPM. Dette sker for alle adresser langs med vejnettet i Landstrafikmodellen (LTM) fra DTU Transport, hvor trafikdata stammer fra. Data om rejsehastigheder er baseret på GPS data fra SpeedMap fra Vejdirektoratet. Gadegeometrien bestemmes ud fra vejnettet og bygningsomrids med bygningshøjder for en given adresse.
- For Danmark anvendes emissionsdata med høj geografisk opløsning på 1x1 km² (SPREAD model), og for Europa og den øvrige nordlige halvkugle anvendes en række internationale emissionsopgørelser. Data om emissionerne af forurenende stoffer er for danske kilder baseret på den Danske nationale emissionsopgørelse for alle luftforureningerne undtagen partikelantal.
- I den danske nationale emissionsopgørelse indgår BC som en særskilt komponent af emissionen af PM_{2,5}. BC indgår ligeledes i de internationale emissionsopgørelser. BC er defineret som kulstofholdige partikler, der absorberer lys. Den danske opgørelse af BC baserer sig i vidt omfang på de standardemissionsfaktorer, der er inkluderet i EMEP/EEA Guidebook, og de er oftest defineret som en fraktion af emissionen af PM_{2,5}. BC blev først inkluderet i EMEP/EEA Guidebook i 2013, og der er i mange tilfælde gjort den tilnærmelse, at BC kan antages at være lig med EC (Elementært kulstof), pga. manglende måledata for BC.
- Partikelantal indgår ikke i den officielle nationale emissionsopgørelse og heller ikke i de officielle internationale emissionsopgørelser, da det ikke er et krav, at der skal foretages emissionsopgørelser for partikelantal. I forbindelse med et forskningsprojekt om sammenhængen mellem partikelantal og helbredseffekter for perioden 1979-2018, har Aarhus Universitet implementeret partikelantal i modellerne DEHM, UBM og OSPM. Det er første gang, at der præsenteres beregninger af partikelantal.

Output fra modelsystemet er i teorien partikler med en størrelse på ca. 10-1000 nm, som vi her betegner partikelantal. Enheden "nm" er nanometer, og er en milliardtedel af en meter. Enheden for koncentrationen af partikelantal er antal pr. cm^3 . Når partikelantal måles er det målte antal meget følsomt over for afskæringspunkterne især i den lave ende af spektret. Modelleret partikelantal er derfor også sammenlignet med målinger af antallet af partikler med et nedre afskæringspunkt på omkring 10 nm.

Validering af modelsystem

Beregningerne er sammenlignet med målinger fra det nationale overvågningsprogram for luftkvalitet for at vurdere usikkerheden på modelberegningerne i 2019, og begrænsninger i anvendelse af beregningsresultaterne er kort diskuteret for forskellige situationer og kilder.

Luftkvalitetskort i 2019

Luftkvaliteten i 2019 for hhv. baggrundskoncentrationer og gadekoncentrationer for NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , BC (Black Carbon) og partikelantal er illustreret på kort og beskrevet statistisk.

Indikative overskridelser af grænseværdien for NO_2 i 2019

Der er foretaget en detaljeret analyse af beregnede indikative overskridelser af grænseværdien for NO_2 i 2019 (LPDV 2.0), og udviklingen siden 2012 (LPDV 1.0) i antal overskridelser er også beskrevet.

1.3 Hovedkonklusioner

Validering af modelsystem i 2019

Modelberegninger i overvågningsprogrammet (NOVANA) samt modelberegninger i Luften på din vej (LPDV) er sammenlignet med målinger i overvågningsprogrammet. Modelberegningerne i overvågningsprogrammet er for gadestationerne baseret på trafikoplysningerne indhentet fra kommunerne for de pågældende gader, som vurderes at have mindre usikkerhed end data fra Landstrafikmodellen. Som en del af overvågningsprogrammet foretages modelberegninger hvert år for omkring 100 gader i København og 30 gader i Aalborg. For modelberegninger i LPDV er der taget det nærmeste adressepunkt til at repræsentere placering af gademålestationerne, og trafikniveauer er fra Landstrafikmodellen.

NO_2

Sammenligning mellem overvågningsprogrammets modelsystem og målinger for NO_2 -koncentrationerne for 2019 viser en overestimering på 17%-18% for tre ud af fire gadestationer i overvågningsprogrammet. For den fjerde station, Odense, er overestimeringen på 67% ligesom den også i foregående år har været signifikant overestimeret. De modellerede NO_2 -koncentrationer er også overestimeret på baggrundsstationerne.

I LPDV modelleres samme NO_2 -koncentrationer som i overvågningsprogrammet for H.C. Andersens Boulevard og Jagtvej i København, men i Aarhus modelleres samme niveau som målingerne og i Odense er overestimeringen kun 27%.

I tilfældet med gadestationen i Aarhus er modelresultaterne i LPDV på samme niveau som målingerne, men inputdata til modellen er delvis ukorrekt, men kompenserer hinanden. Lidt mere trafik, lidt lavere rejsehastighed og

højere baggrunds niveau giver alt andet lige højere modellerede koncentrationer, mens lavere busandel giver lavere koncentrationer. Kombinationen af dette gør, at det modellerede niveau ender på 23 µg/m³ ligesom målingerne.

Grunden til at overestimeringen i LPDV for gadestationen i Odense er mindre end i overvågningsprogrammet er ligeledes en kombination af forskelle i inputdata.

Modelsystemet har således en tendens til at overestimere noget for NO₂ i forhold til målingerne.

PM_{2,5} og PM₁₀

For PM_{2,5} ligger modelresultaterne for LPDV mellem -8% og 8% for gadestationerne og for baggrundsstationer ligger modelresultaterne mellem -10% og 5% fra målingerne. For PM₁₀ underestimerer modelresultaterne lidt fra -13% til 0% for gadestationerne og for baggrundsstationerne ligger modelresultaterne mellem -10% til 0%.

Modelsystemet rammer niveauet af målinger for både gadekoncentrationer og baggrundskoncentrationer ganske tilfredsstillende for PM_{2,5} og PM₁₀.

BC

Der gennemføres ikke modelberegninger af BC i overvågningsprogrammet. BC måles ikke direkte i overvågningsprogrammet, men EC (Elementært kulstof) måles, som kan anvendes som en indikator for BC. Modelberegningerne i Luften på din vej er kun 7% over EC målingerne for H.C. Andersens Boulevard i København, mens modelresultaterne afviger fra målte koncentrationer fra -6% til 38% for baggrundsstationerne. En tidligere mere detaljeret analyse af sammenhængen mellem beregninger af BC-baggrundskoncentrationer og målt EC fra 2010 til 2019, viser at DEHM/UBM er i stand at reproducere udviklingstendenser over tid med faldende koncentrationer samt sæsonvariationen inden for et år.

Trods god sammenhæng mellem beregninger og målinger vurderes der fortsat at være betydelig usikkerhed på modelresultaterne, da der er usikkerhed i emissionsopgørelsen og usikkerhed om i hvilken grad målte EC repræsenterer BC.

Partikelantal

De seneste tilgængelige målinger af partikelantal over 10 nm, som modelresultaterne er sammenlignelige med, er fra 2016. Modelsystemet underestimerer med omkring 20% for H.C. Andersens Boulevard i København, og overestimerer meget for baggrundsstationerne, mellem 135% og 211%. Det betyder, at det modellerede gadebidrag er meget mindre end, hvad målingerne tilsiger. Gadebidraget er forskellen mellem gadekoncentrationen på H.C. Andersens Boulevard og baggrundskoncentrationen på H.C. Ørsted Institutet.

De modellerede baggrundskoncentrationer er således overestimeret, hvilket påvirker alle adresser i Danmark, og forskellen mellem baggrund og trafikerede gader er for lille. Der er derfor stor usikkerhed på de modellerende partikelantal i LPDV.

Begrænsninger

Der er en række kilder i modelsystemet, som ikke er så detaljeret beskrevet. Det drejer sig om luftforurening fra trafik på motorveje, togtrafik, brændeovne og mindre industrikilder. Modelsystemet beregner for lave koncentrationer ved boliger tæt på motorveje inden for omkring 200 m. Det samme gør sig gældende for boliger langs tognettet med dieseltog, hvor emissionen dog er langt lavere end fra motorveje. Bidraget fra brændeovne indgår også på en gennemsnitlig måde, da bidraget beregnes på baggrund af emissionen fra brændeovne inden for en kvadratkilometer. Det betyder, at bidraget fra brændeovne er mere udjævnet end man kan forvente i virkeligheden, da bidraget fra hver enkelt kilde ikke modelleres separat. Det samme gælder for mindre industrikilder.

Modelleret luftkvalitet i 2019

I rapporten er der præsenteret kort over den geografiske variation for hhv. baggrundskoncentrationer og gadekoncentrationer for de fem luftforurenende stoffer for 2019. Endvidere er den statistiske variation beskrevet for de fem luftforureninger. Dette gøres som histogrammer, hvor antallet af adresser, som ligger i forskellige koncentrationsintervaller er vist.

Den geografiske variation er forskellig for de forskellige stoffer, og afhænger af, hvor betydningsfuld den regionale baggrundsforurening er, og hvilke kilder i Danmark, som er betydningsfulde, og deres geografiske variation.

NO₂

Ud over et regionalt bidrag, har lokale kilder tydelig indvirkning på den geografiske fordeling af baggrundskoncentrationer af NO₂ over land- og havområder. Vejtrafikkens bidrag ses klart som forhøjede koncentrationer i de større byer og langs store transportkorridorer. Skibsruterne med international skibstrafik gennem Storebælt og Kattegat sætter også sit tydelige præg med høje koncentrationer. Sidstnævnte giver også anledning til forhøjede koncentrationer i de tilstødende kystnære landområder. Effekten af emissioner fra Molslinjen mellem Aarhus og Odden ses også tydelig.

Vejtrafikkens bidrag til den geografiske variation er tydelig med forhøjede gadekoncentrationer i de større byer og langs store transportkorridorer.

PM_{2,5}

Den geografiske fordeling af baggrundskoncentrationer af PM_{2,5} har et andet mønster end NO₂, da der er en tydelig gradient fra syd til nord med højere PM_{2,5}-koncentrationer i det sydlige Danmark end i det nordlige Danmark. Dette skyldes, at PM_{2,5}-koncentrationer er domineret af regional baggrundsforurening fra Vest- og Centraleuropa.

Gradienten fra syd til nord genfindes også i gadekoncentrationerne af PM_{2,5}, men bidrag fra trafikerede gader ses også.

PM₁₀

Den geografiske fordeling af baggrundskoncentrationer af PM₁₀ er tydeligt påvirket af bidrag af havsalt fra havsprøjt. Dette ses som høje PM₁₀-koncentrationer på Vestkysten af Jylland og i mindre grad på de vestlige kyster af øerne i de indre farvande. Dette skyldes den dominerende vestenvind. Der er også generelt høje koncentrationer i havområderne men aftagende fra Vesterhavet til Østersøen. Den samme gradient fra syd til nord som for PM_{2,5} er til dels også synligt for PM₁₀, da PM_{2,5} er en del af PM₁₀.

Den geografiske variation af gadekoncentrationer af PM_{10} er præget af variationen i baggrundskoncentrationerne, men bidrag fra vejtrafik viser sig også som højere koncentrationer i især de større byer.

BC

Ud over et regionalt bidrag er den geografiske fordeling af baggrundskoncentrationer af BC domineret af forbrændingskilder fra vejtrafik, brændeovne, og kraftværker, men også i et vist omfang fra skibstrafik. Forhøjede koncentrationer forekommer i og omkring de større byer.

Detaljeret analyse viser, at de højeste BC-koncentrationer forekommer lokalt omkring kraftværker eller store industrivirksomheder som Aalborg Portland. Det vil kræve mere detaljerede beregninger, fx med OML-modellen, for at evaluere, om UBM beregner bidraget fra disse kilder korrekt.

Baggrundskoncentrationerne har tydelig indflydelse på den geografiske variation af gadekoncentrationer, men herudover forekommer der også forhøjede BC-koncentrationer på trafikerede veje, ligesom brændeovne lokalt kan spille en betydelig rolle for forhøjede BC-koncentrationer.

Partikelantal

Den geografiske variation af baggrundskoncentrationen af partikelantal følger i høj grad den geografiske variation af NO_2 og til dels BC. Vigtige kilder er skibstrafik, brændeovne, vejtrafik, og kraftværker.

Den geografiske variation af baggrundskoncentrationerne betyder meget for variationen i gadekoncentrationerne, men det er også tydeligt, at der er forhøjede koncentrationer langs trafikerede veje.

Der er væsentlig usikkerhed på både niveauet og den geografiske fordeling, da modelsystemet overestimerer i baggrundsbidraget og underestimerer gadebidraget i forhold til målingerne. Der er derfor mindre geografisk variation i det modellerede partikelantal end målinger viser.

Sammenligning med grænseværdier

Beregnete koncentrationer er sammenlignet med grænseværdier og WHO's retningslinjer for luftkvalitet.

EU's grænseværdier er gældende lovgivning i Danmark via implementering i danske bekendtgørelser. Miljøministeriet/Miljøstyrelsen har ansvaret for at grænseværdierne overholdes. Grænseværdien for NO_2 er $40 \mu g/m^3$, $25 \mu g/m^3$ for $PM_{2,5}$, og $40 \mu g/m^3$ for PM_{10} . Da grænseværdien er defineret som et heltal, vil der være en overskridelse ved fx værdien $40,5 \mu g/m^3$ for NO_2 .

Verdenssundhedsorganisation (WHO) har fremsat nogle retningslinjer for luftkvalitet (air quality guidelines). Disse retningslinjer er ikke juridisk bindende. WHO's retningslinjer er omkring 40% af EU's grænseværdier for $PM_{2,5}$ (dvs. $10 \mu g/m^3$) og halvdelen for PM_{10} (dvs. $20 \mu g/m^3$), mens de er ens for NO_2 ($40 \mu g/m^3$).

Da der kan være stor usikkerhed på de beregnede luftkoncentrationer og modelberegninger kun indgår som et supplerende værktøj til vurdering af luftkvaliteten, så kalder vi de beregnede overskridelser for indikative.

Der er ingen grænseværdier for BC og partikelantal.

PM_{2,5}

Beregnete niveauer er væsentligt under grænseværdien for årsmiddel af PM_{2,5} på 25 µg/m³. WHO's retningslinjer for PM_{2,5} på 10 µg/m³ er overskridet på mange adresser.

PM₁₀

Beregnete niveauer er væsentligt under grænseværdien på 40 µg/m³ som årsmiddel for PM₁₀. WHO's retningslinjer for PM₁₀ er 20 µg/m³, som overskrides på en del adresser.

NO₂

Grænseværdien for NO₂ som årsmiddelværdi er 40 µg/m³. WHO's retningslinjer for luftkvalitet er ligeledes 40 µg/m³.

I 2019 er der i alt 27 adresser, som overstiger værdien 40,5 µg/m³, og er dermed indikative overskridelser af grænseværdien.

Ud af de 27 indikative overskridelser af grænseværdien for NO₂ er der 24 i København og 3 i Aarhus.

Detaljeret analyse viser, at trafikniveauet i Landstrafikmodellen og den beregnede gadegeometri i langt de fleste tilfælde vurderes at være repræsentativ for de faktiske forhold. Men da modelsystemet overestimerer NO₂, er det sandsynligt, at der ikke er tale om reelle overskridelser af grænseværdien på strækningerne, men dog høje koncentrationer.

I Luften på din vej 1.0 blev der for 2012 beregnet 1.123 indikative overskridelser af grænseværdien for NO₂. Der forekom overskridelser i København og omegn, Aarhus og Aalborg i 2012.

I 2019 er beregnet 24 indikative overskridelser i København og 3 indikative overskridelser i Aarhus. Antallet af indikative overskridelser er således faldet drastisk fra 2012 til 2019. Endvidere er den beregnede maksimale koncentration også faldet fra 64,6 µg/m³ til 47,6 µg/m³.

Faldet i de modellerede koncentrationer og dermed også i antallet af beregnede indikative overskridelser er i overensstemmelse med det generelle fald i målte NO₂-koncentrationer på målestationerne i overvågningsprogrammet for luftkvalitet i Danmark.

2 Summary in English

2.1 Background and purpose

Air Quality at Your Street is a digital air quality map, which is accessible to everyone and which shows the air quality for all addresses in Denmark. The purpose of the air quality map is to illustrate the geographical variation of air quality in Denmark for selected health-related air pollutants. DCE-Danish Centre for Environment and Energy at Aarhus University has updated air quality data on Air Quality at Your Street to cover 2019 and has included new air pollutants. The new updated version is called Air Quality at Your Street 2.0. The concentration of a number of harmful substances is calculated with air quality models, and the air quality map can be viewed on the website <http://luftenpaadinvej.au.dk>. The interface is in Danish and English. The purpose of this report is to describe Air Quality at Your Street 2.0.

The first version of Air Quality at Your Street (now called 1.0) was launched in 2016 and included calculated annual mean concentrations for 2012 of NO₂ (nitrogen dioxide), PM_{2.5} (particles below 2.5 micrometers) and PM₁₀ (particles below 10 micrometers). As something new for 2019, BC (Black Carbon) and particle number concentration are also included in Air Quality at Your Street 2.0. Particle numbers are approximately the same as ultrafine particles.

Air Quality at Your Street may give an indication of potential exceedances of air quality limit values, but due to the greater uncertainty on modelling, official announcements are primarily based on measurements from measurement stations under the National Air Quality Monitoring Programme. Air Quality at Your Street 2.0 has become part of the monitoring programme as a complementary tool for assessment of air quality in Denmark. We term modelled exceedances as indicative exceedances.

DCE has provided air quality data on a professionally sound basis with a description of associated uncertainties. DCE is not liable for misinformation due to data errors, nor can DCE be held liable for loss or damage, either directly or indirectly, as a result of the use of air quality data. Data are purely indicative in nature. Data can only be used to give the user an overall assessment. It is therefore recommended that any user obtain further information before the user, for example, initiates actions based on expectations about air pollution.

Possible applications of Air Quality at Your Street are:

- Assessment of air quality where you live, work or educate yourself in relation to other areas
- Assessment of air quality at institutions for children, young people and the elderly
- Assessment of air quality in different places to support in a situation where you want to move from one place to another
- Get an indication of air quality in relation to limit values
- Teachers can use the air quality map for educational purposes.

2.2 Methodology

Model system

Air quality is calculated with air quality models. These models describe mathematically different physical and chemical processes. These are emission of air pollution from various sources, their dispersion, chemical transformation and deposition, the influence of buildings, etc., and meteorological conditions.

The air quality is calculated with a model system called DEHM/UBM/AirGIS that has been developed by Aarhus University over a number of years. The model system includes a regional transport model (DEHM), a high-resolution background model (UBM) and a street air quality model (OSPM) with associated meteorology and emission data, etc.:

- Meteorological data used in all models are based on the meteorological model WRF (Weather, Research and Forecasting).
- DEHM in combination with UBM calculates the background concentrations.
- OSPM calculates street concentrations where background concentrations are also included.
- AirGIS is used to generate input on traffic and street geometry for OSPM. This is done for all addresses along the road network of the National Danish Transport Model (LTM) from DTU Transport, where traffic data is from. Data on travel speeds is based on GPS data from SpeedMap from the Danish Road Directorate. Street geometry is determined by the road network and building footprints with building heights for a given address.
- For Denmark, emissions data with high geographical resolution of 1x1 km² (SPREAD model) are used, and for Europe and the rest of the northern hemisphere a number of international emission inventories are used.
- Data on air emissions are for Danish sources based on the Danish national emission inventory for all air pollution except particle numbers. BC is also included in the international emission inventories as a separate component of PM_{2.5} emissions. BC is defined as carbon-containing particles that absorb light. The Danish calculation of BC is largely based on the standard emission factors included in the EMEP/EEA Guidebook and is most often defined as a fraction of PM_{2.5} emissions. BC was first included in the EMEP/EEA Guidebook in 2013, and in many cases it is an approximation that BC can be assumed to be equal to EC (Elemental Carbon) due to lack of measurement data for BC.
- Particle numbers are not included in the official national emission inventory or in the official international emission inventories, as emission inventories for particle numbers are not required. In connection with a research project on the relationship between particle numbers and health effects for the period 1979-2018, Aarhus University has implemented particle numbers in the models DEHM, UBM and OSPM. This is the first time that calculations for particle number concentrations have been presented.

Output from the model system is in theory particles with a size of approx. 10-1000 nm, which we here denote particle number concentrations. The unit "nm" is nanometer, and is one billionth of a meter. The unit of concentration of

particle numbers is number per cm³. When measuring particle numbers, the measured number is very sensitive to the cut-off points, especially at the low end of the spectrum. Modelled particle number concentrations are therefore also compared to measurements of the number of particles with a lower cut-off point of approx. 10 nm.

Validation of model system

The model calculations are compared to measurements from the National Air Quality Monitoring Programme to assess uncertainties on the model results for 2019. Further, limitations on the use of the calculation results are briefly discussed for different situations and sources.

Air quality map in 2019

Air quality in 2019 for background concentrations and street concentrations for NO₂, PM_{2.5}, PM₁₀, BC (Black Carbon) and particle numbers is illustrated in maps and described statistically.

Indicative exceedances of the NO₂ limit value in 2019

A detailed analysis of calculated indicative exceedances of the limit value for NO₂ in 2019 (LPDV 2.0) has been carried out and developments since 2012 (LPDV 1.0) in number of exceedances have also been described.

2.3 Main conclusions

Validation of model system in 2019

Model calculations in the National Air quality Monitoring Program (NOVANA) as well as model calculations in Air Quality at Your Street (LPDV) are compared to measurements in the monitoring program. The model calculations in the monitoring programme for the street stations are based on traffic information obtained from the municipalities for the streets concerned, which are considered to have less uncertainty than data from the National Transport Model (LTM). As part of the monitoring programme, model calculations are made every year for about 100 streets in Copenhagen and 30 streets in Aalborg. For model calculations in LPDV, the nearest address point has been taken to represent the location of the street measurement stations, and traffic levels are from the National Transport Model (LTM).

NO₂

Comparison between model results from the monitoring programme and measurements for NO₂ concentrations for 2019 shows an overestimation of 17%-18% for three out of four street stations in the monitoring programme. For the fourth station, Odense, the overestimation is 67% and in previous years there has also been significant overestimations for this station. The modelled NO₂ concentrations are also overestimated at the background stations.

In LPDV, the same NO₂ concentrations are modelled as in the monitoring programme for H.C. Andersens Boulevard and Jagtvej in Copenhagen, but also in Aarhus and in Odense the overestimation is only 27%.

In the case of the street station in Aarhus, the model results in LPDV are at the same level as the measurements, but input data for the model is partially incorrect, but compensates each other. A little more traffic, slightly lower travel speed and higher background levels give all other things equal, higher modelled concentrations, while lower bus share results in lower

concentrations. The combination of this means that the modelled level ends at 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, just like the measurements.

The reason why the overestimation in LPDV for the street station in Odense is less than in the monitoring program is also a combination of differences in input data.

Thus, the modelling system tends to overestimates somewhat for NO_2 in relation to the measurements.

PM_{2.5} and PM₁₀

For $\text{PM}_{2.5}$, the model results for LPDV range between -8% and 8% when compared to street stations, and model results range between -10% and 5% compared to background stations. For PM_{10} , model results are slightly underestimated with -13% to 0% for street stations and for the background stations, model results range from -10% to 0% of measurements.

The model system estimates the level of measurements for both street concentrations and background concentrations quite satisfactorily for $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} .

BC

BC modelling is not performed in the monitoring program and BC is not measured directly in the monitoring programme, but EC (Elemental Carbon) is measured, which can be used as an indicator of BC. The model calculations in Air Quality at Your Street are only 7% above the EC measurements for H.C. Andersens Boulevard in Copenhagen, while the model results differ from measured concentrations from -6% to 38% for the background stations. A previous more detailed analysis of the correlation between BC of background concentration calculations and measured EC from 2010 to 2019 shows that DEHM/UBM is able to reproduce trends over time with decreasing concentrations as well as seasonal variation within a year.

Despite good correlation between calculations and measurements, there is still considerable uncertainty in the model results, as there is uncertainty in the emission inventory and uncertainty about the degree of how good EC measured represents BC.

Particle number

The most recent available measurements of particle numbers above 10 nm, with which the model results are comparable, are from 2016. The modelling system underestimates by approx. 20% for H.C. Andersens Boulevard in Copenhagen, and overestimates a lot for the background stations, between 135% and 211%. This means that the modelled street contribution is much less than what the measurements suggest. The street contribution is the difference between the street concentration at H.C. Andersens Boulevard and the background concentration at the H.C. Ørsted Institute. The modelled background concentrations are thus overestimated, which affects all addresses in Denmark, and the difference between background and busy streets is too small. The uncertainty on the modelling particle numbers in LPDV is therefore large.

Model limitations

There are a number of sources in the modelling system that are not described in detail. These are air pollution from motorway traffic, rail traffic, wood-

burning stoves and small industrial sources. The modelling system calculates too low concentrations at homes close to motorways within about 200 m. The same applies to dwellings along the rail network with diesel-powered trains, where emissions are, however, much lower than from motorways. The contribution from wood-burning stoves is also included in an average way, as the contribution is calculated on the basis of the emissions from wood-burning stoves within one square kilometre. This means that the contribution of wood-burning stoves is more smoothed out than can be expected in reality, since the contribution of each source is not modelled separately. The same applies to small industrial sources.

Modelled air quality in 2019

The report presents maps of the geographical variation of background concentrations and street concentrations for the five air pollutants for 2019. In addition, the statistical variation is described for the five air pollutants. This is done as histograms, where the number of addresses located in different concentration intervals is shown. The geographical variation is different for the different pollutants and depends on the importance of regional background pollution and the sources in Denmark and their significance and their geographical variation.

NO₂

In addition to a regional contribution, local sources have a clear impact on the geographical distribution of background concentrations of NO₂ over land and sea areas. The contribution of road traffic is clearly seen as increased concentrations in major cities and along major transport corridors. The shipping routes with international shipping traffic through the Great Belt and the Kattegat also show high concentrations. The latter also give rise to increased concentrations in neighbouring coastal areas. The effect of emissions from the ferry line between Aarhus and Odden is also evident (the ferry line of Molslinjen).

The contribution of road traffic to geographical variation is evident with increased street concentrations in major cities and along major transport corridors.

PM_{2,5}

The geographical distribution of background concentrations of PM_{2,5} has a different pattern than NO₂, as there is a clear gradient from south to north with higher PM_{2,5} concentrations in southern Denmark than in northern Denmark. This is because PM_{2,5} concentrations are dominated by regional background pollution from Western and Central Europe.

The gradient from south to north is also found in the street concentrations of PM_{2,5}, but contributions from busy streets are also seen.

PM₁₀

The geographical distribution of background concentrations of PM₁₀ is clearly influenced by contributions of sea salt from sea spray. This is seen as high PM₁₀ concentrations on the west coast of Jutland and to a lesser extent on the western coasts of the islands in the inland waters. This is due to the dominant westerly wind. There are also generally high concentrations in the sea areas but decreasing from the North Sea to the Baltic Sea. The same gradient from south to north as for PM_{2,5} is partly visible to PM₁₀, as PM_{2,5} is part of PM₁₀.

The geographical variation of street concentrations of PM₁₀ is characterized by the variation in background concentrations, but contributions from road traffic also show up as elevated concentrations, especially in the larger cities.

BC

In addition to a regional contribution, the geographical distribution of background concentrations of BC is dominated by combustion sources from road traffic, wood-burning stoves, and power plants, but also to some extent from shipping traffic. Elevated concentrations occur in and around major cities.

Detailed analysis shows that the highest BC concentrations occur locally around power plants or large industrial companies such as Aalborg Portland. It will require more detailed calculations, e.g. with the OML model, to evaluate whether UBM correctly calculates the contribution from these sources.

Background concentrations have a clear influence on the geographical variation of street concentrations, but in addition there are also increased BC concentrations on busy roads, and wood-burning stoves can play a significant role locally for elevated BC concentrations.

Particle numbers

The geographical variation of the background concentration of particle numbers largely follows the geographical variation of NO₂ and, to some extent, BC. Important sources are shipping traffic, wood-burning stoves, road traffic, and power plants.

The geographical variation of background concentrations means a lot to the variation in street concentrations, but it is also clear that there are elevated concentrations along busy roads.

There is considerable uncertainty at both the level and the geographical distribution, as the modelling system overestimates the background contribution and underestimates the street contribution in relation to the measurements. There is therefore less geographical variation in the modelled particle number concentrations than the measurements show.

Comparison with limit values and WHO guidelines

Calculated concentrations are compared to limit values and WHO guidelines for air quality.

EU limit values are applicable legislation in Denmark through implementation in Danish regulations. The Ministry of the Environment/Danish Environmental Protection Agency is responsible for compliance with the limit values. The limit value for NO₂ is 40 µg/m³, 25 µg/m³ for PM_{2.5}, and 40 µg/m³ for PM₁₀. Because the limit value is defined as an integer, there will be an exceedance if, for example, the value 40.5 µg/m³ is exceeded for NO₂.

The World Health Organisation (WHO) has stated air quality guidelines. These guidelines are not legally binding. WHO guidelines are around 40% of the EU limit values for PM_{2.5} (10 µg/m³) and half for PM₁₀ (20 µg/m³), while they are the same for NO₂ (40 µg/m³). Since there may be large uncertainty on the calculated air concentrations and model calculations only are an

additional tool for assessing air quality, we call the calculated exceedances indicative.

There are not limit values for BC and particle number.

PM_{2.5}

Calculated levels are significantly below the limit value for annual mean of PM_{2.5} of 25 µg/m³. WHO's guidelines for PM_{2.5} are 10 µg/m³, and are exceeded at many addresses.

PM₁₀

Calculated levels are significantly below the limit value of 40 µg/m³ as annual means of PM₁₀. WHO's guidelines for PM₁₀ are 20 µg/m³, and are exceeded at a number of addresses.

NO₂

The limit value for NO₂ as annual mean is 40 µg/m³. The WHO air quality guidelines are also 40 µg/m³. In 2019, there are a total of 27 addresses that exceed the value 40.5 µg/m³, thus they are indicative exceedances of the limit value. Of the 27 indicative exceedances of the limit value for NO₂, there are 24 in Copenhagen and 3 in Aarhus. Detailed analysis shows that in the vast majority of cases, the traffic level in the National Transport Model and the calculated street geometry are considered representative of the actual conditions. However, as the modelling system overestimates NO₂, it is likely that there are no real exceedances of the limit value on the street segments, but elevated concentrations.

1,123 indicative exceedances of the NO₂ limit value were calculated for 2012 in Air Quality at Your Street 1.0. There were exceedances in Copenhagen and the surrounding area, Aarhus and Aalborg in 2012. In 2019, 24 indicative exceedances have been calculated in Copenhagen and 3 indicative exceedances in Aarhus. Thus, the number of indicative exceedances has decreased dramatically from 2012 to 2019. In addition, the calculated maximum concentration has also decreased from 64.6 µg/m³ to 47.6 µg/m³. The decrease in the modelled concentrations and thus also in the number of calculated indicative exceedances is consistent with the general decrease in measured NO₂ concentrations at the monitoring stations of the air quality monitoring programme in Denmark.

3 Anvendte modelsystem og inputdata

Luftkvaliteten er beregnet med luftkvalitetsmodeller. Disse modeller beskriver matematisk de elementer som indgår. Det drejer sig om emissionen af luftforurening fra forskellige kilder, spredningen heraf, stoffernes kemiske omdannelse og afsætning, indflydelse fra bygninger mv., samt de meteorologiske forhold.

Luftkvaliteten er beregnet med et modelsystem som kaldes DEHM/UBM/AirGIS, og består af en regional langtransportmodel (DEHM), en baggrundsmodel med høj opløsning (UBM) og en gadeluftkvalitetsmodel (OSPM) med tilhørende meteorologi og emissionsdata mv.:

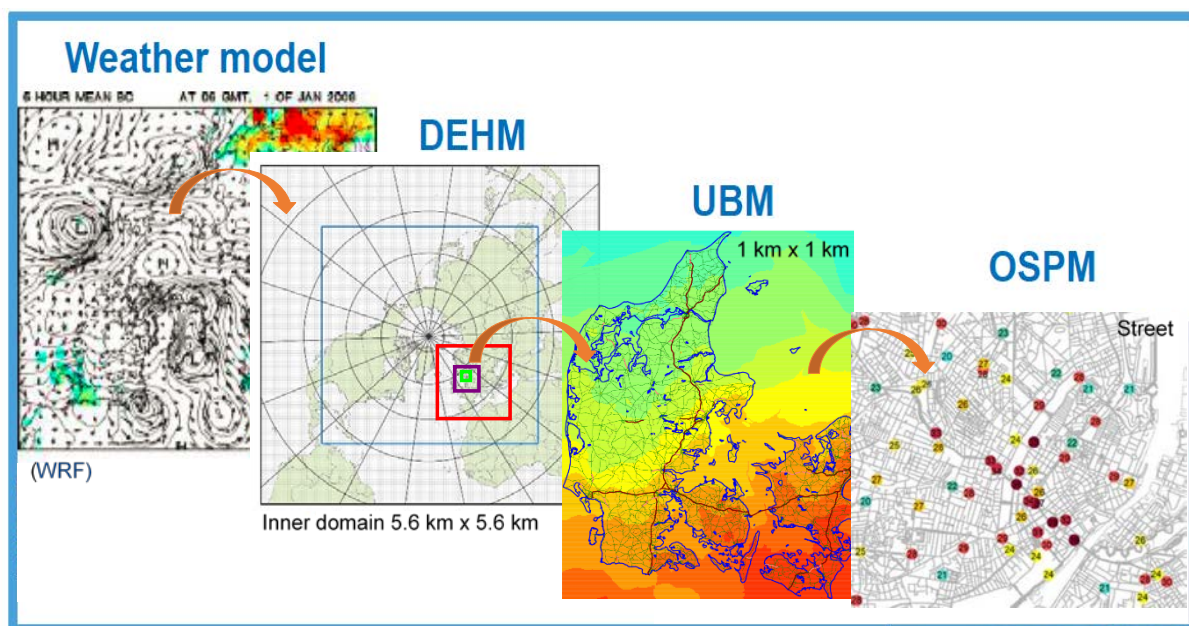
- DEHM i kombination med UBM beregner baggrundskoncentrationen
- OSPM beregner gadekoncentrationer, hvor baggrundskoncentrationer også indgår.
- AirGIS anvendes til generering af input om trafik og gadegeometri til OSPM. Dette sker for alle adresser langs med vejnettet i Landstrafikmodellen (LTM) fra DTU Transport, hvor trafikdata stammer fra. Data om rejsehastigheder er baseret på GPS data fra SpeedMap fra Vejdirektoratet. Gadegeometrien bestemmes ud fra vejnettet og bygningsomrids med bygningshøjder for en given adresse.
- For Danmark anvendes emissionsdata med høj geografisk opløsning på 1x1 km² (SPREAD model), og for Europa og den øvrige nordlige halvkugle anvendes en række internationale emissionsopgørelser.
- Meteorologiske data er baseret på den meteorologiske model WRF (Weather, Research and Forecasting).

I Figur 3.1 er illustreret den anvendte meteorologiske model og de anvendte luftkvalitetsmodeller. Koblingen mellem modellerne er illustreret. Den regionale model (DEHM) dækker hele den nordlige halvkugle. For området omkring Danmark udføres beregningerne for et net af gitterceller med en størrelse på 5,6 km x 5,6 km. Data fra DEHM overføres til baggrundsmodellen med høj opløsning (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 for de enkelte gadestrækninger. Beregninger med OSPM gennemføres kun for veje med mere end 500 biler om dagen. I figuren til højre vises et udsnit af de beregnede gadestrækninger i København.

Modelsyste­met er det samme og med samme forudsætninger for 2019, som anvendes i forbindelse med det nationale overvågningsprogram for luftkvalitet i Danmark til beregning af gadekoncentrationer for 98 gader i København og 26 gader i Aalborg (Ellermann et al., 2021).

Ovenstående modelsystem og tilhørende data for 2012 for Luften på din vej (version 1.0) er beskrevet i en populærvidenskabelig artikel på dansk (Jensen et al., 2017a) og i en videnskabelig artikel på engelsk (Jensen et al., 2017b).

I det følgende er de anvendte modeller og tilhørende inputdata nærmere beskrevet.



Figur 3.1. Illustration af den anvendte meteorologiske model (WRF) og luftkvalitetsmodeller på forskellige skalaer.

Modellerne er integreret i det samlede modelsystem DEHM/UBM/AirGIS, som er grundigt beskrevet i en række internationale publikationer og på DCE's hjemmesider (Brandt et al., 2000, 2001 og 2003). Modelsystemet består af følgende delelementer:

3.1 DEHM

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 beregner luftforureningen 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 ca. 15 km af atmosfæren og indeholder et omfattende kemisk modul til beregning af de relevante kemiske reaktioner. Modellen er dokumenteret i Christensen (1997), Brandt et al. (2012) og på <http://au.dk/DEHM>.

3.2 UBM

UBM (Urban Background Model): Oprindeligt var denne model kun beregnet til at beskrive luftforureningen i baggrundsområder i byer (Berkowicz (2000b)), men siden 2008 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) og på <http://au.dk/UBM>.

3.3 OSPM

OSPM® (Operational Street Pollution Model): Som sidste led i modelkæden beregner OSPM® (www.au.dk/ospm) luftkvaliteten i 2 meters højde ved husfacaderne for gadestrækninger. OSPM beskriver simple fotokemiske reaktioner mellem NO₂, NO og O₃, som er relevant 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, køretøjssammensætning, rejsehastighed og detaljerede udledningsfaktorer fra den Europæiske trafikemissionsmodel COPERT 5. Resultater fra UBM indgår som input til OSPM. Modellen er fx dokumenteret i Berkowicz (2000a) og Ketzel et al. (2012).

3.4 AirGIS

AirGIS: Denne del af modelkæden anvendes til at håndtere de mange inputdata til beregningerne med OSPM. Det drejer sig om trafikmængder 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>).

Bygningsdata og adressedata

Gadegeometrien bestemmes ud fra vejnettet og bygningsomrids med bygningshøjder for en given adresse. Gadegeometri er fx vejorienteringen, gadebredde, og bygningshøjder i forskellige vindsektorer.

Digitaliserede adresser stammer fra Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering. Der er 2,5 mio. adresser i 2019, og der var 2,4 mio. adresser i 2012. Adresserne er downloaded i februar 2021 fra Danmarks Adressers Web API (DAWA) (<http://dawa.aws.dk/>).

Bygningsomrids stammer fra GeoDanmark, som repræsenterer det tidlige 2018. Bygningsomrids indeholder i udgangspunktet ikke bygningshøjden. Bygningshøjden er for et bygningsomrids beregnet ud fra Danmarks Højdemodel (DHM) ligeledes fra GeoDanmark fra det tidlige 2018 (www.geodanmark.dk).

Danmarks Højdemodel (DHM) består af flere datasæt, der tilvejebringes ved laserscanning af hele Danmark fra fly. Den består af 415 milliarder punktdata, der bruges til at kortlægge højdeforskelle for terræn og overflade i 0,4 m grid for hele landet. Differencer mellem overflade og terræn er beregnet for alle datapunkter i et bygningsomrids. Bygningshøjden er fastsat til 90-percentilen af alle differencer inden for en bygning for at udelukke mindre antal af høje værdier pga. fx skorstene, antenner og målefejl.

3.5 Meteorologiske data

Luftkvalitetsmodellerne kræver meteorologiske data for at kunne modellere koncentrationerne. Disse datasæt bliver genereret med den meteorologiske

model WRF (Weather Research and Forecasting Model) opsat for de samme områder og niveauer af geografisk opløsning, som DEHM-modellen. WRF er udviklet af National Center for Atmospheric Research, USA (NCAR) (Se Skamarock et al. (2008) for detaljer). Anvendte meteorologiske data dækker år 2019.

3.6 Danske og udenlandske emissioner

Data om udledningerne af forurenende stoffer er for danske kilder baseret på den Danske nationale emissionsopgørelse for 2018 fra DCE (<https://envs.au.dk/en/research-areas/air-pollution-emissions-and-effects/air-emissions/>; Nielsen et al., 2020) og for øvrige kilder baseret på internationale emissions-opgørelser for 2017 fra EMEP (www.emep.int). De danske emissioner er geografisk fordelt ud fra forskellige geografiske fordelingsnøgler med SPREAD-modellen (Plejdrup et al., 2018). Udledningerne for skibstrafik i nærheden af Danmark baseres på en opdatering af en særskilt opgørelse som DCE oprindeligt udarbejdede med høj geografisk opløsning i 2009 (Olesen et al., 2009). I Danmark er den geografiske opløsning af emissionerne på 1 km x 1 km.

Luften på din vej 2.0 anvender samme meteorologiske data og emissions data, som ligger til grund for den årlige afrapportering for overvågningsprogrammet for 2019 (Ellermann et al., 2021). Dette gælder for baggrundsberegningerne med DEHM/UBM. Bemærk således at i foråret 2021 er seneste tilgængelige kvalitetssikrede emissionsdata for Danmark opgørelsen for 2018, og med hensyn til internationale emissioner er det nyeste datasæt for 2017. Emissionerne er altså ét til to år ældre end det aktuelle beregningsår, som her er 2019. Da der er en faldende tendens i danske og internationale emissioner vil emissionerne i 2017 og 2018, alt andet lige, være lidt højere end de faktiske emissioner i 2019.

Emissionsfaktorerne anvendt i gadeluftkvalitetsmodellen OSPM er fra 2019, og bilparkens sammensætning mht. Euronormklasser, brændstof mv. afspejler også 2019.

BC i den nationale emissionsopgørelse

I den danske nationale emissionsopgørelse indgår BC som en særskilt komponent af emissionen af PM_{2,5}. BC indgår ligeledes i de internationale emissionsopgørelser. I forbindelse med rapportering under FN's konvention om langtransporteret grænseoverskridende luftforurening og EU's direktiv om nationale emissionslofter, er der en opfordring til, at landene rapporterer emissionsopgørelser for BC. BC er i den forbindelse defineret som kulstofholdige partikler, der absorberer lys. Den danske opgørelse af BC baserer sig i vidt omfang på de standardemissionsfaktorer, der er inkluderet i EMEP/EEA Guidebook (EEA, 2019a), og de er oftest defineret som en fraktion af emissionen af fine partikler (PM_{2,5}). BC blev først inkluderet i EMEP/EEA Guidebook i 2013, og der er i mange tilfælde gjort den tilnærmelse, at BC kan antages at være lig med EC (Elementært kulstof), pga. manglende måledata for BC.

Særlig høj usikkerhed knytter sig til emissionssektoren SNAP05. SNAP05 omfatter emissioner fra udvinding, behandling, lagring og transport af brændsler (kul, olie og gas), herunder kullagring. Der er især manglende viden og usikkerhed omkring andelen af BC i PM_{2,5} for SNAP05 for kullagring.

Første nye emissionsopgørelse for partikelantal

Partikelantal indgår ikke i den officielle nationale emissionsopgørelse og heller ikke i de officielle internationale emissionsopgørelser fra EMEP, da det ikke er et krav, at der skal foretages emissionsopgørelser for partikelantal.

I forbindelse med et forskningsprojekt om sammenhængen mellem partikelantal og helbredseffekter for perioden 1979-2018, har Aarhus Universitet implementeret partikelantal i modellerne DEHM, UBM og OSPM. Modelberegninger af baggrundskoncentrationen på 1 km x 1 km for Danmark for 2018 er anvendt i Luften på din vej 2.0 sammen med OSPM beregninger for 2019. En detaljeret beskrivelse af den emissionsopgørelse, der anvendes i den regionale model (DEHM) og i baggrundsmodellen med høj opløsning (UBM) findes i en videnskabelig artikel, som er under review (maj, 2021) og forventes publiceret i 2021 (Frohn et al., 2021). I gadeluftkvalitetsmodellen OSPM er emissionsfaktorer for partikelantal implementeret fra "EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook" (EEA, 2019). En detaljeret beskrivelse findes i en videnskabelig artikel, som er under review (maj, 2021) og forventes publiceret i 2021 (Ketzel et al., 2021).

De totale emissioner til DEHM/UBM og emissionsfaktorer til OSPM for antallet af partikler er meget usikre i forhold til de mere veldokumenterede emissioner for traditionelle forurenende stoffer (NO_x , $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} , osv.). Datasituationen er således meget kompleks, meget usikker, og generelt er det vanskeligt at udlede validerede og realistiske emissioner for partikelantal. De fleste partikler fra trafikemissioner er 10-30 nm i størrelse, og de omdannes hurtigt og er vanskelige at måle.

Ud over at emissionerne er usikre er den komplekse dynamiske partikeldannelse og transformation ikke fuldt forstået, og dermed heller ikke modelmæssigt beskrevet.

Output fra modelkæden DEHM-UBM-OSPM vurderes at være mest repræsentativ for partikler i området 10-1000 nm, som vi her betegner partikelantal.

3.7 Trafikdata

Modelberegningerne med OSPM kræver detaljerede data om trafikken på den enkelte gadestrækning (trafikmængde, hastighed, køretøjssammensætning m.m.).

Landstrafikmodellen

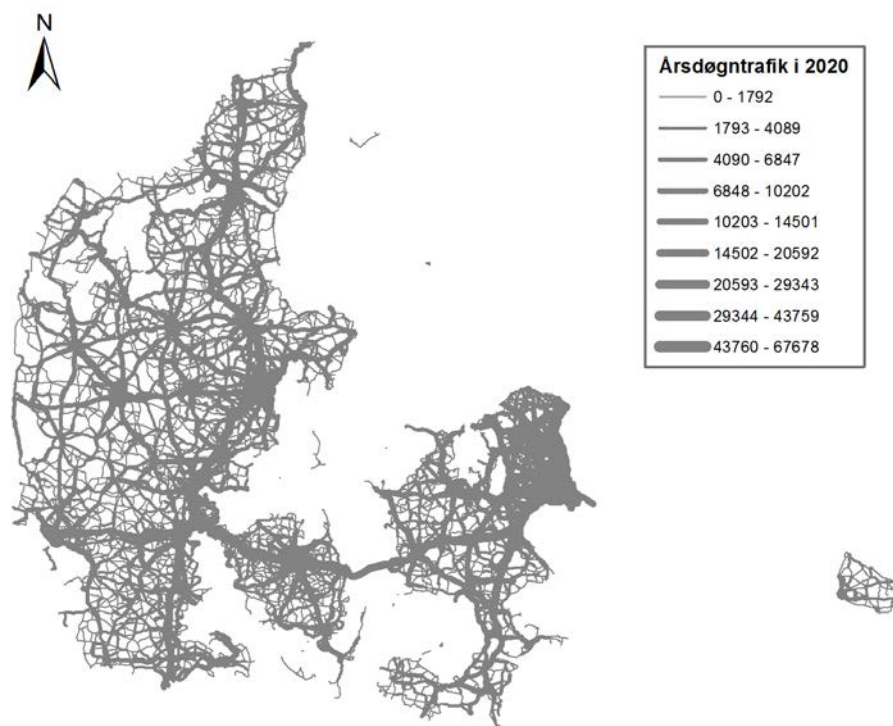
Trafikdata til Luften på din vej stammer fra vejnettet i Landstrafikmodellen (LTM) med tilhørende trafikdata. LTM er udviklet af DTU Transport. Drift og videreudvikling af Landstrafikmodellen er overgået til Vejdirektoratet i 2021 (<https://www.vejdirektoratet.dk/landstrafikmodellen>).

I Luften på din vej 1.0 var luftkvalitetsdata fra 2012 og trafikdata repræsenterede trafikdata i 2010. I Luften på vej 2.0 er luftkvalitetsdata fra 2019 og trafikdata repræsenterer 2020. Trafikdata fra 2020 er genereret af DTU fra LTM version 2.2.2 med ScenarioID 10053 og leveret i februar 2020. Det grundlæggende trafikdata i LTM2.2.2 er fra 2015 og trafikdata for 2020 er et prognoseår. Trafikdata for 2020 tager således ikke hensyn til effekten af nedlukningerne på trafikken i forbindelse med corona. Denne generelle udviklingstendens er, at trafikken i Danmark stiger med nogle få procent om året, derfor vil trafikken i prognoseåret være meget tæt på trafikken i 2019.

Vejnettet i LTM2.2.2 til Luften på din vej 2.0 har flere veje inkluderet i forhold tidligere anvendte LTM-vejnet i Luften på din vej 1.0. Det er typisk flere mindre fordelingsveje, som er inkluderet.

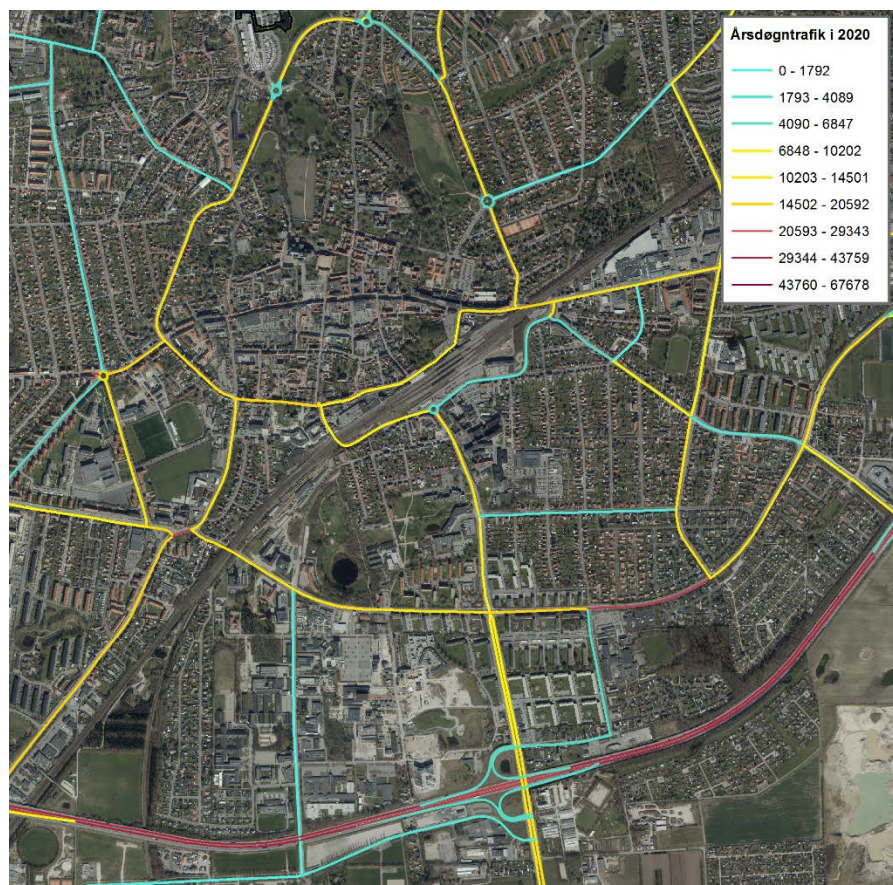
Årsdøgntrafikken

Trafikniveauet i LTM er hverdagsdøgntrafik, mens OSPM anvender årsdøgntrafikken dvs. den gennemsnitlige døgntrafik over et år. Vejdirektoratet har udviklet en række skaleringsfaktorer for forskellige vejtyper og køretøjstyper, som er anvendt til at skalere fra hverdagsdøgntrafik til årsdøgntrafik (Vejdirektoratet, 2006). Årsdøgntrafikken i 2020 på LTM2.2.2-vejnettet er vist i Figur 3.2.



Figur 3.2. Årsdøgntrafikken i 2020 på LTM2.2.2-vejnettet.

I Figur 3.3 er vejnettes detaljeringsgrad illustreret for Roskilde. Bemærk at fx motorveje er dobbelt digitaliserede dvs. hver retning for sig. Trafikmængden er derfor også vist for hver strækning.



Figur 3.3. Detaljeringsgraden af LTM2.2.2-vejnettet med Roskilde som eksempel. Baggrundskort fra Kortforsyningen.

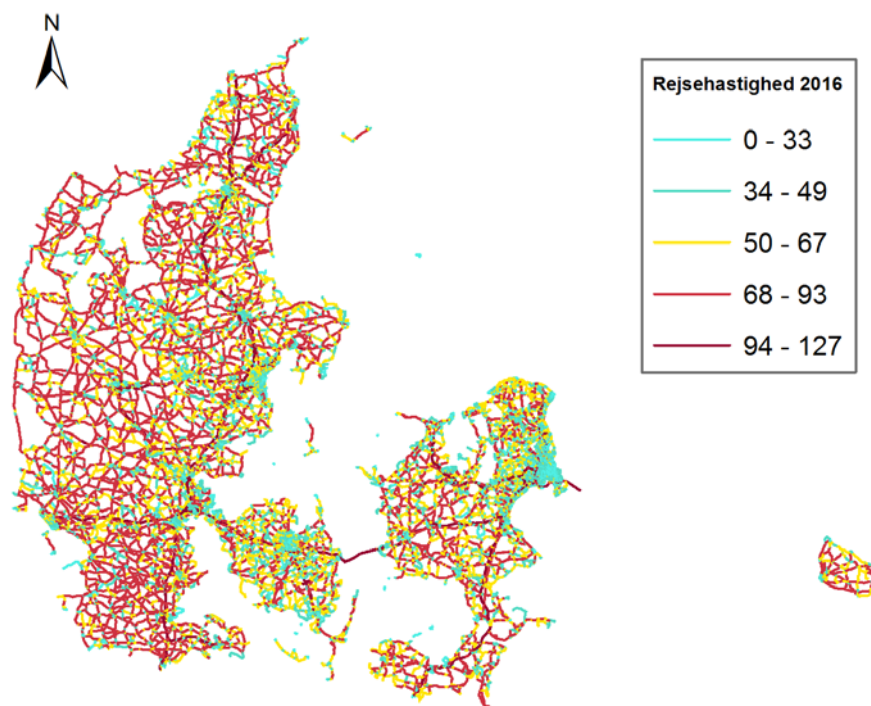
Rejsehastigheder

LTM indeholder ikke rejsehastigheder, dvs. den gennemsnitlige hastighed over en strækning, som anvendes i OSPM. Vejdirektoratet har udviklet et nationalt datasæt med rejsehastigheder, som er baseret på indsamling af GPS data fra en lang række køretøjer på det danske vejnet. Datasættet betegnes SpeedMap. Vejdirektoratet har tidligere haft et projekt, hvor SpeedMap blev knyttet til vejnettet i LTM. Dette datasæt blev anvendt til Luften på din vej 1.0, hvor rejsehastighedsdata var repræsentativt for 2012. Firmaet HERMES stod for koblingen mellem LTM og SpeedMap, som ikke var på identiske geografiske vejnet. Det kræver avancerede metoder at flytte data fra vejnettet for SpeedMap til vejnettet for LTM. I forbindelse med Luften på vej 2.0 har DCE købt firmaet HERMES til at foretage denne kobling, som blev gennemført i november 2020. Det seneste tilgængelige SpeedMap datasæt er fra 2016, hvilket er anvendt. Vejdirektoratet har stoppet videreudviklingen af SpeedMap datasættet, så der ikke fremover vil være data for nyere år. Det vurderes, at rejsehastigheder generelt udvikler sig meget langsomt over tid, og derfor kan datasættet fra 2016 anvendes til at repræsentere rejsehastigheder i 2019.

Koblingen mellem LTM-vejnettet og SpeedMap-vejnettet kan ikke automatisk gennemføres 100%, og det nye LTM-vejnet indeholder tilmed flere veje end SpeedMap-vejnettet.

LTM2.2.2-vejnettet indeholder 53.025 vejsegmenter. 3.384 vejsegmenter havde ikke trafikoplysninger og 11.161 vejsegmenter fik ikke tildelt rejsehastighedsdata ved overføring af rejsehastigheder fra SpeedMap til LTM. De vejsegmenter, som ikke indeholdt trafik og rejsehastigheder, var fx mindre

forbindelsesveje, ramper eller rundkørsler. Vi udviklede et script i GIS, som tildelte det laveste trafikniveau og laveste rejsehastighed fra tilstødende vej-segmenter. Herved fik alle vejsegmenter med manglende data tildelt data. Rejsehastigheder i 2016 på LTM2.2.2-vejnettet er vist i Figur 3.4.



Figur 3.4. Rejsehastigheder (km/t) i 2016 fra SpeedMap på LTM2.2.2-vejnettet.

Køretøjssammensætning

OSPM kræver information om køretøjssammensætningen i form af fordelingen mellem personbiler, varebiler, lastbiler <32t, lastbiler >32t og busser.

LTM2.2.2 indeholder oplysninger om personbiler, varebiler og tung trafik. Vi har sammenlignet disse oplysninger med trafiktællinger fra 98 gader i København og 30 gader i Aalborg, og der var en ringe sammenhæng mellem modelleret værdier af LTM og målte værdier. Derfor har vi anvendt en standard køretøjsfordeling for ikke at introducere tilfældige usikkerheder.

Standardkøretøjsfordelingen er defineret for forskellige vejtyper i OSPM. Ud over køretøjsfordelingen beskriver disse vejtyper også døgnfordelingen af trafikken og rejsehastigheder for de forskellige køretøjskategorier for forskellige ugedage. Der er otte forskellige typer, som beskriver forskellige typer af veje (betegnet med A-H). I DCE's vej- og trafikdatabase er disse knyttet til KORT10 vejnettet fra Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering. Oplysninger om vejtyper i LTM er benyttet til at vurdere, hvilken OSPM vejtype, som er mest repræsentativ, se Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Sammenhæng mellem KORT10 vejtyper, OSPM vejtyper og LTM vejtyper

Vejtype KORT10	Vejtypekode KORT10	OSPM vejtype	LTM vejtyper
Motorvej	2111	B	1 (Motorvej), 2 (Rampe, Motorvej)
Motortrafikvej	2112	B	3 (Motortrafikvej), 4 (Rampe, Motortrafikvej)
Vej > 6 m	2115	F	5 - 17
Vej 3-6 m	2122	D	20-32
Anden vej	2123	C	None

For yderligere detaljer om OSPM vejtyper, standard køretøjssammensætning og døgnfordelinger af trafik og rejsehastigheder se Jensen et al. (2019).

3.8 Sammenligning mellem modelleret og talt trafikdata

I det følgende sammenlignes modelleret trafikdata fra LTM2.2.2 med DCE vej- og trafikdatabase, og med talt trafikdata i København og Aalborg.

Trafikarbejde

I Tabel 3.2 er trafikarbejdet i 2020 i DCE's vej- og trafikdatabase sammenlignet med trafikarbejdet i LTM2.2.2. Trafikarbejdet er kørt km på vejnettet om året.

Som forventet er der meget god overensstemmelse af længderne af motorveje og motortrafikveje, da disse er veldefinerede vejtyper i begge datasæt. Der er også rimelig overensstemmelse for veje over 6 m, selvom disse ikke er defineret på samme måde i LTM2.2.2. For andre veje er vejnettet i LTM2.2.2 som forventet meget mindre, da mange mindre veje ikke er med i LTM2.2.2, mens DCE's vej- og trafikdatabase har alle veje med.

Der er god overensstemmelse mellem trafikarbejdet på motorveje, motortrafikveje og veje over 6 m, mens LTM2.2.2 har et lidt mindre trafikarbejde på andre veje, da en del mindre veje ikke er med i LTM2.2.2.

Det samlede trafikarbejde i LTM2.2.2 er kun 10% mindre end trafikarbejdet i DCE's vej- og trafikdatabase, hvilket vidner om, at andre veje har lav trafikbelastning.

Samlet set er der rigtig god overensstemmelse mellem LTM2.2.2 og DCE vej- og trafikdatabase for trafikarbejdet i 2020 for sammenlignelige vejtyper.

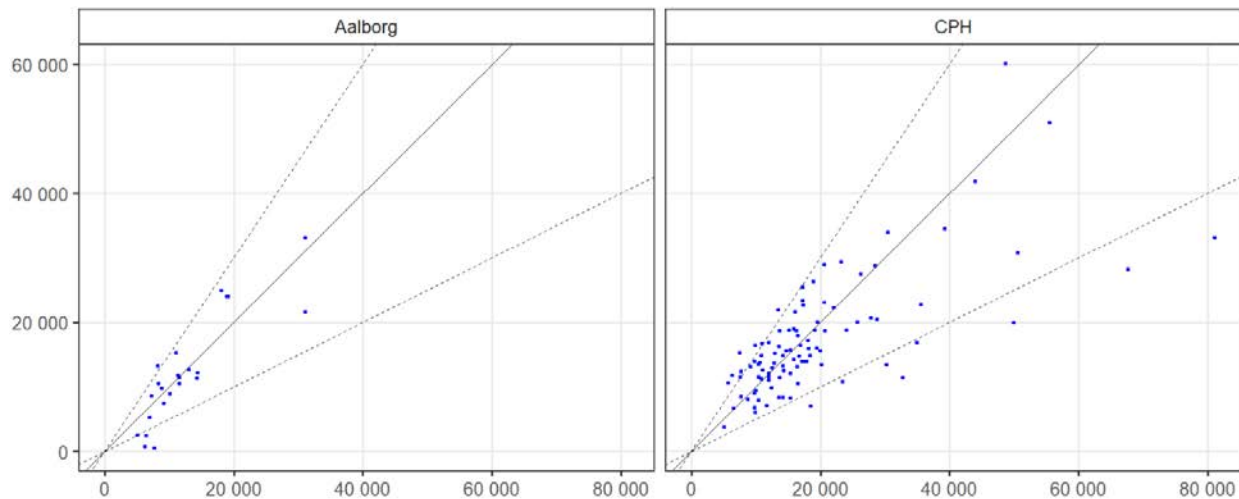
Tabel 3.2. Sammenligning af trafikarbejde i 2020 i DCE vej- og trafikdatabase og LTM2.2.2.

Vejtype	DCE vej- og trafikdatabase	DCE vej- og trafikdatabase	LTM2.2.2	LTM2.2.2
	Trafikarbejde Mia. km	Vejlængde (1000 km)	Trafikarbejde Mia. km	Vejlængde (1000 km)
Motorvej	18,6	3,2	17,8	3,0
Motortrafikvej	1,5	0,4	1,7	0,6
Vej > 6 m	20,6	14,0	21,5	9,7
Andre veje	18,7	143,5	13,1	18,7
Total	59,5	161,1	54,1	32,0

Sammenligning med trafikdata i overvågningsprogrammet for luftkvalitet

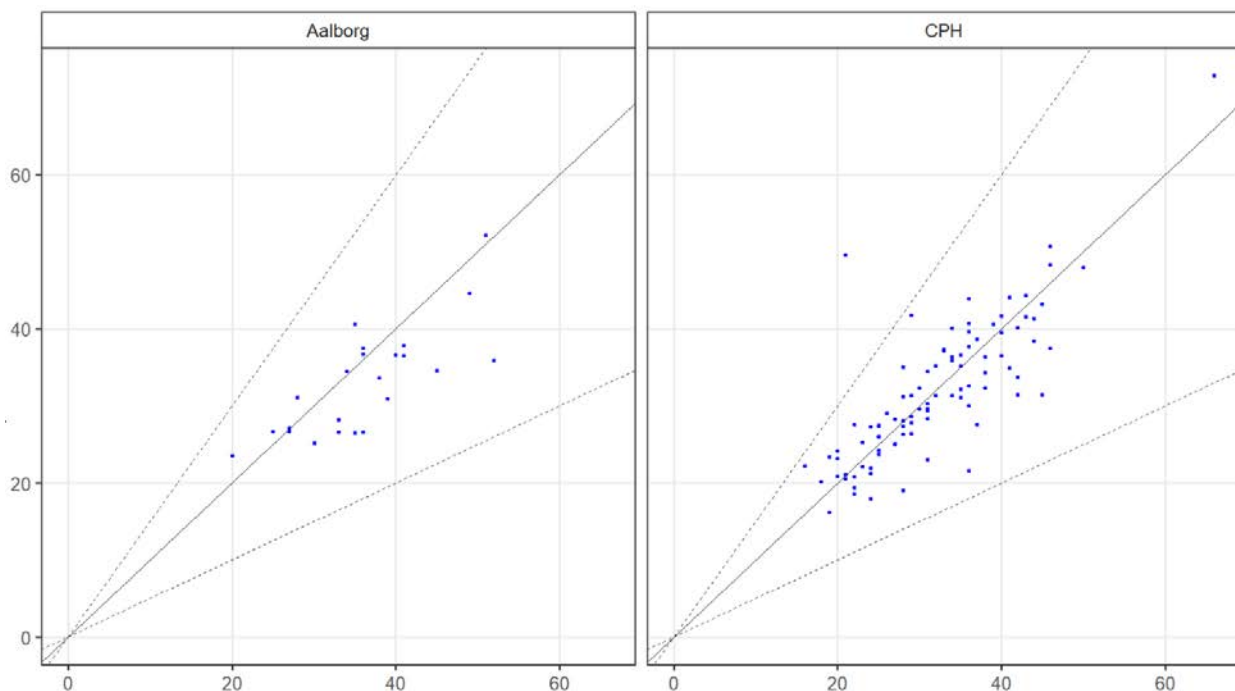
I det følgende sammenlignes trafikdata for enkelte veje i LTM2.2.2 med talt trafik fra samme veje i København og Aalborg. I overvågningsprogrammet for luftkvalitet i Danmark gennemføres der luftkvalitetsberegninger for 98 gader i København og 26 gader i Aalborg. I den forbindelse leverer Københavns Kommune og Aalborg Kommune årsdøgntrafik og køretøjssammensætning. Trafikdata er så vidt muligt baseret på automatiske eller manuelle trafiktællinger på den enkelte gadestrækning. Rejsehastigheder er baseret på SpeedMap data. Trafikdata er fra 2019, og repræsenterer de nyeste tal, og de sammenlignes med modelleret trafik fra LTM2.2.2 i 2020. Trafikken på gaderne i København og Aalborg har stort set været konstante igennem en længere årrække (Ellermann et al., 2021).

I Figur 3.5 er vist et scatterplot for Aalborg og København, hvor talt årsdøgntrafik i overvågningsprogrammet (x-akse) er sammenlignet med modelleret årsdøgntrafik i LTM2.2.2 (y-akse). Det ses, at der er en rimelig god sammenhæng mellem talt og modelleret trafik.



Figur 3.5. Sammenligning mellem talt årsdøgntrafik (x-akse) og modelleret årsdøgntrafik i LTM2.2.2 (y-akse) i Aalborg og København. 1:1 linjen er indtegnet, og de stiplede linjer markerer følgende. Værdier fra Landstrafikmodellen, som er 50% højere end talte værdier, ligger over den øverste stiplede linje. Værdier fra Landstrafikmodellen, som ligger under den nederste stiplede linje, er 50% under talte værdier.

I Figur 3.6 er vist et scatterplot for Aalborg og København, hvor rejsehastigheder i overvågningsprogrammet (x-akse) er sammenlignet med rejsehastigheder i LTM2.2.2 (y-akse). Rejsehastigheder i overvågningsprogrammet er fra SpeedMap, som er aflæst fra SpeedMap kortet, og kan være fra forskellige år mellem 2012 og 2015. I LTM2.2.2 er rejsehastigheder ligeledes fra SpeedMap, men overført fra SpeedMap vejnet fra 2016 til vejnet for LTM2.2.2 i en avanceret kort-matching proces udført af firmaet HERMES. Der er en rimelig god sammenhæng mellem de to datasæt, hvilket også er forventeligt, da begge datasæt er baseret på SpeedMap.



Figur 3.6. Sammenligning mellem rejsehastighed (km/t) i overvågningsprogrammet (x-akse) og rejsehastighed i LTM2.2.2 (y-akse) i Aalborg og København. 1:1 linjen er indtegnet, og de stiplede linjer markerer følgende. Værdier tilknyttet Landstrafikmodellen, som er 50% højere end værdier fra overvågningsprogrammet, ligger over den øverste stiplede linje. Værdier tilknyttet Landstrafikmodellen, som ligger under den nederste stiplede linje, er 50% under værdier fra overvågningsprogrammet.

3.9 Begrænsninger

Der er en række kilder i modelsystemet, som ikke er så detaljeret beskrevet. Det drejer sig om luftforurening fra trafik på motorveje, togtrafik, brændeovne og mindre industrikilder. Modelsystemet beregner for lave koncentrationer ved boliger tæt på motorveje inden for omkring 200 m. Det samme gør sig gældende for boliger langs tognettet med dieseltog, hvor emissionen dog er langt lavere end fra motorveje. Bidraget fra brændeovne indgår også på en gennemsnitlig måde, da bidraget beregnes på baggrund af emissionen fra brændeovne inden for en kvadratkilometer. Det betyder, at bidraget fra brændeovne er mere udjævnet end man kan forvente tæt på kilderne, da bidraget fra hver enkelt kilde ikke modelleres separat. Det samme gælder for mindre industrikilder.

4 Validering af modelberegninger i 2019

I dette kapitel sammenlignes målinger fra Det nationale overvågningsprogram for luftkvalitet med LPDV og med modelberegninger, som rutinemæssigt foretages hvert år for målestationerne for udvalgte stoffer som en del af overvågningsprogrammet. Sammenligningen foretages for NO_2 , $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} , BC og partikelantal i 2019.

De anvendte modeller i overvågningsprogrammet er valideret og dokumenteret i en række internationale videnskabelige publikationer. Modellerne har høj international standard, hvilket blandt andet kan ses ved, at DEHM nu er en del af det europæiske samarbejde Copernicus Atmospheric Monitoring Service (CAMS), hvor det kun er udvalgte europæiske modeller, der indgår. Dette samarbejde leverer kvalitetskontrollerede operationelle luftkvalitetsprognoser for Europa (<https://atmosphere.copernicus.eu/>). OSPM er ligeledes en international anerkendt gadeluftkvalitetsmodel, og anvendt i en lang række lande (www.au.dk/ospm).

Kvaliteten af resultaterne fra modelberegningerne vurderes løbende ved sammenligning mellem model- og måleresultater.

Heller ikke for 2019 er der foretaget justering af resultaterne for beregning af årsmiddelværdier for kvælstofdioxid. Til gengæld er der i lighed med tidligere år gennemført en justering for partikelforureningen ($\text{PM}_{2,5}$ og PM_{10}), hvilket hænger sammen med, at det på nuværende tidspunkt ikke er muligt at inkludere alle partikulære luftforureningskomponenter i modelberegningerne (Ellermann et al., 2021). En væsentlig del af den manglende masse formodes at være vand bundet til partikler, som er inkluderet i målingerne men ikke i modelberegningerne. På engelsk betegnes udfordringen med den manglende masse som "mass closure", og det er et velkendt fænomen i alle regional-skala modeller. I både 2012 og 2019 er $\text{PM}_{2,5}$ og PM_{10} ganget med en faktor på 1,33 for at tage højde for dette. Forudsætningerne for denne kalibrering er nærmere beskrevet i Ellermann et al. (2021).

4.1 Sammenligning mellem målinger og modelberegninger i overvågningsprogrammet og LPDV i 2019

NO_2 , $\text{PM}_{2,5}$ og PM_{10}

Sammenligning mellem modelresultater og målinger for NO_2 -koncentrationerne for 2019 er vist i Tabel 4.1. Der er både vist resultater fra modelberegninger i overvågningsprogrammet (NOVANA) samt modelberegninger i Luften på din vej (LPDV). Modelberegningerne i overvågningsprogrammet er for gadestationerne baseret på trafikoplysningerne indhentet fra kommunerne for de pågældende gader, som vurderes at have mindre usikkerhed end data fra Landstrafikmodellen i LPDV. For modelberegninger i LPDV er der taget det nærmeste adressepunkt til at repræsentere placering af gademålestationerne, og trafikniveauer er fra Landstrafikmodellen.

Sammenligning mellem modelresultater (NOVANA) og målinger for NO_2 -koncentrationerne for 2019 viser en overestimering på 17%-18% for tre ud af fire gadestationer i overvågningsprogrammet. For den fjerde station, Odense, er overestimeringen på 67% ligesom den også i foregående år har været sig-

nifikant overestimeret. De modellerede NO₂-koncentrationer er også overestimeret på baggrundsstationerne. For alle årene samlet set siden 1995 er der kun en mindre forskel på modelresultater i forhold til målinger på omkring 10%, og det er inden for de seneste par år at overestimeringen finder sted.

I LPDV modelleres samme NO₂-koncentrationer som i overvågningsprogrammet (NAVANA) for H.C. Andersens Boulevard og Jagtvej i København, men i Aarhus modelleres samme niveau som målingerne (0% difference) og i Odense er overestimeringen kun 27% (i sammenligning med 67% for NOVANA modelberegningerne).

I tilfældet med gadestationen i Aarhus er modelresultaterne i LPDV på samme niveau som målingerne, men inputdata til modellen er delvis ukorrekt men kompenserer hinanden. Lidt mere trafik, lidt lavere rejsehastighed og højere baggrunds niveau giver alt andet lige højere modellerede koncentrationer, mens lavere busandel giver lavere koncentrationer. Kombinationen af dette gør, at det modellerede niveau ender på 23 µg/m³ ligesom målingerne.

Grunden til at overestimeringen i LPDV for gadestationen i Odense er mindre end i NOVANA er ligeledes en kombination af forskelle i inputdata.

Som forventet er de modellerede NO₂-baggrundskoncentrationer stort set ens i NOVANA og i LPDV, da modelsystem og inputdata er ens, og det er kun afrunding, der i få tilfælde giver en lille forskel.

Tabel 4.1. Sammenligning af årsmidler for modellerede og målte NO₂-koncentrationer i 2019.

Enhed: µg/m ³	Målinger (NOVANA)	Modelresultater (NOVANA)	Difference (NOVANA)	Modelresultater (LPDV)	Difference (LPDV)	Model
Gade:						
København/H CAB/1103	33	39	18%	39	18%	DEHM/UBM/OSPM
København/Jagtvej/1257	24	28	18%	28	18%	DEHM/UBM/OSPM
Aarhus/6153	23	27	17%	23	0%	DEHM/UBM/OSPM
Odense/9156	15	25	67%	19	27%	DEHM/UBM/OSPM
Bybaggrund:						
København/1259	12	15	23%	15	23%	DEHM/UBM
Aarhus/6160	11	14	20%	14	20%	DEHM/UBM
Odense/9159	10	12	21%	12	21%	DEHM/UBM
Aalborg/8159	10	11	9%	11	9%	DEHM/UBM
Hvidovre/2650	12	13	8%	13	8%	DEHM/UBM
Landbaggrund:						
Risø/2090	7	10	56%	10	56%	DEHM/UBM
Føllesbjerg/9055	7	10	42%	11	57%	DEHM/UBM
Ulborg / 7060	4	6	44%	6	44%	DEHM/UBM
Anholt/6001	4	7	63%	7	63%	DEHM/UBM

PM_{2,5} og PM₁₀

I Tabel 4.2 og 4.3 er vist en sammenligning mellem modelresultater og målinger for hhv. PM_{2,5} og PM₁₀. Det ses, at der fås næsten identiske modelresultater i NOVANA og LPDV.

For PM_{2,5} ligger modelresultaterne for LPDV mellem -8% og 8% for gadestationerne, og for baggrundsstationer ligger modelresultaterne mellem -10% og 5% fra målingerne. For PM₁₀ underestimerer modelresultaterne lidt fra -13%

til 0% for gadestationerne, og for baggrundsstationerne ligger modelresultaterne mellem -10% til 0%.

Modelsystemet rammer niveauet af målinger for både gadekoncentrationer og baggrundskoncentrationer ganske tilfredsstillende for PM_{2,5} og PM₁₀.

Tabel 4.2. Sammenligning mellem årsmidler af modellerede (inkl. korrektion) og målte PM_{2,5}-koncentrationer i 2019.

Enhed: µg/m ³	Målinger (NOVANA)	Modelresultater (NOVANA)	Difference (NOVANA)	Modelresultater (LPDV)	Difference (LPDV)	Model anvendt
Gade:						
København/H CAB/1103	14	14	3%	13	8%	DEHM/UBM/OSPM
København /Jagtvej/1257	12	12	0%	12	0%	DEHM/UBM/OSPM
Aarhus/6153	12	12	-4%	11	-8%	DEHM/UBM/OSPM
Bybaggrund:						
København /1259	11	11	-6%	10	-10%	DEHM/UBM
Aarhus/6160	10	10	5%	10	0%	DEHM/UBM
Aalborg/8159	10	9	-9%	9	-9%	DEHM/UBM
Hvidovre/2650	10	11	7%	10	0%	DEHM/UBM
Landbaggrund:						
Risø/2090	11	11	-1%	11	-1%	DEHM/UBM

Tabel 4.3. Sammenligning mellem årsmidler af modellerede (inkl. korrektion) og målte PM₁₀-koncentrationer i 2019.

Enhed: µg/m ³	Målinger (NOVANA)	Modelresultater (NOVANA)	Difference (NOVANA)	Modelresultater (LPDV)	Difference (LPDV)	Model anvendt
Gade:						
København/H CAB/1103	27	25	-6%	24	-13%	DEHM/UBM/OSPM
København/Jagtvej/1257	22	21	-4%	20	-8%	DEHM/UBM/OSPM
Aarhus/6153	20	22	6%	20	0%	DEHM/UBM/OSPM
Odense/9156	21	23	6%	20	-5%	DEHM/UBM/OSPM
Bybaggrund:						
Copenhagen/1259	17	17	-2%	17	-2%	DEHM/UBM
Landbaggrund:						
Føllesbjerg/9055	19	19	0.5%	18	-5%	DEHM/UBM
Risø/2090	16	17	2%	16	0%	DEHM/UBM

BC/EC

I overvågningsprogrammet måles Elementært kulstof (EC), som 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 EC kommer fra en ufuldstændig forbrænding (for eksempel i udstødning fra køretøjer). EC omtales også som black carbon (BC), fordi elementært kulstof er sort. Måleteknisk set er der stor forskel på de to parametre. EC er et mål for mængden af kulstofatomer i en given prøve (µg elementært kulstof per m³), hvilket måles med en kemisk analyse af prøven. BC er et mål for, hvor "sort" prøven er, hvilket måles med en absorptionsmåling (kan omregnes til enheden µg/m³). Typisk vil der være god sammenhæng mellem de to forskellige parametre. Der er dog forskel fra lokalitet til lokalitet, og der kan være relativt stor forskel på BC og EC.

De anvendte luftkvalitetsmodeller anvender emissionsdata fra Danmark og udlandet. I Danmark og de øvrige europæiske lande udarbejdes nationale opgørelser over udledningerne af BC, mens der ikke laves opgørelser for EC. Datagrundlaget for opgørelse af udledningerne af BC er begrænset, så derfor er der i den fælleseuropæiske guidebog (EEA, 2019) ofte tale om estimering af udledningerne af BC på baggrund af udledningsfaktorer for EC. Da forskellen mellem EC og BC er lille set i forhold til de store usikkerheder forbundet med opgørelserne over udledningerne, så er det fagligt forsvarligt at sammenstille målingerne af EC med opgørelserne over udledningerne af BC.

Som det fremgår af Tabel 4.4 ligger modelberegningerne i LPDV kun 7% under EC målingerne for H.C. Andersens Boulevard i København, mens modelresultaterne afviger fra målte koncentrationer mellem -6% og 38% for baggrundsstationerne. En mere detaljeret analyse af sammenhængen mellem DEHM/UBM beregninger af BC og målt EC fra 2010 til 2019, viser at DEHM/UBM er i stand at reproducere udviklingstendenser over tid med faldende koncentrationer samt sæsonvariationen inden for et år (Jensen et al., 2021).

Tabel 4.4. Sammenligning mellem årsmidler af modellerede BC- og målte EC-koncentrationer i 2019.

Enhed: $\mu\text{g}/\text{m}^3$	EC-målinger (NOVANA)	BC- modelresultater (LPDV)	Difference (LPDV)	Model
<i>Gade</i>				
København/H CAB/1103	1,01	0,94	-7%	DEHM/UBM/OSPM
<i>Bybaggrund</i>				
København/1259	0,32	0,44	38%	DEHM/UBM
<i>Forstad</i>				
Hvidovre/2650	0,38	0,36	-6%	DEHM/UBM
<i>Landbaggrund</i>				
Risø/2090	0,26	0,32	23%	DEHM/UBM

Partikelantal

Måleprogrammet omfatter målinger af partikelantal, som er en parameter, der angiver den luftbårne forurening med partikler i nanostørrelse. Disse partikler er så små, at de har meget lille masse, så derfor måles de ved tælling. Måleresultaterne i overvågningsprogrammet fra 2019 dækker partikler i størrelsen fra ca. 41 til 478/550 nm. Bemærk, at resultaterne dermed ikke omfatter partikler mindre end ca. 41 nm, hvilket skyldes tekniske problemer på de nyligt erhvervede instrumenter (fejlen er rettet i 2020). Årsagen til angivelsen af to øvre grænser er, at de gamle og nyerhvervede 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 ubetydeligt i denne sammenhæng.

Tidligere år har der også været målt partikelantal fra ca. 10 nm og opefter, som giver et bedre mål for det samlede partikelantal, og er bedre i overensstemmelse med det modellerede partikelantal, som er output fra modelsystemet. I teorien svarer modelresultater til partikler med en størrelse på ca. 10-1000 nm.

I Tabel 4.5 er vist de seneste tilgængelige målinger af partikelantal over 10 nm, som er fra 2016, og som modelresultaterne er sammenlignelige med. Det ses,

at modelsystemet underestimerer med omkring 20% for H.C. Andersens Boulevard i København, og overestimerer meget for baggrundsstationerne, mellem 135% og 211%. Det ses også, at det modellerede gadebidrag er meget mindre end, hvad målingerne tilsiger. Gadebidraget er forskellen mellem gadekoncentrationen på H.C. Andersens Boulevard og baggrundskoncentrationen på H.C. Ørsted Instituttet.

Tabel 4.5. Sammenligning mellem årsmidler af modelleret partikelantal i 2019 og målt partikelantal i 2016 (over 10 nm).

Enhed: antal/cm ³	Målinger i 2016 (NOVANA)	Modelresultater i 2019 (LPDV)	Difference (LPDV)	Model
<i>Gade</i>				
København/HCAB/1103	13.030	10.800	-21%	DEHM/UBM/OSPM
<i>Bybaggrund</i>				
København/1259	2.930	9.100	211%	DEHM/UBM
<i>Forstad</i>				
Hvidovre/2650	3.740	8.800	135%	DEHM/UBM
<i>Landbaggrund</i>				
Risø/2090	2.970	7.900	166%	DEHM/UBM

Partikelantallet har været målt de seneste knap 20 år og vist faldende koncentrationer over årene (Ellermann et al., 2021).

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 10 – 550 nm-intervallet er dog skønsmæssigt kun omkring 15-25 % højere end antallet af ultrafine partikler i det korrekte størrelsesinterval (Ellermann et al., 2021). Derfor kan det målte partikelantal i hele 10 – 550 nm-intervallet godt tages som et tilnærmelsesvis mål for ultrafine partikler, og det gælder for det modellerede partikelantal.

5 Modelleret luftkvalitet i 2019

I dette kapitel beskrives den geografiske variation af den modellerede luftkvalitet i 2019, og beregningerne beskrives også statistisk.

Baggrundskoncentrationer er vist med en geografisk opløsning på 1 km x 1 km baseret på luftkvalitetsmodellerne DEHM/UBM. Gadekoncentrationer er vist på adresser langs vejnettet for Landstrafikmodellen baseret på DEHM/UBM/AirGIS. Det drejer sig om 330.778 adresser. Adresser som ligger uden for vejnettet for Landstrafikmodellen har kun bidraget fra baggrundskoncentrationerne. Det drejer sig om 2.207.096 adresser. Visualiseres alle disse adresser for hele landet bliver kortet ulæseligt, og derfor er det valgt kun at vise koncentrationer på adresser langs vejnettet for Landstrafikmodellen. Der indgår således i alt 2.537.874 adresser i datasættet.

Beregnete koncentrationer sammenlignes endvidere med grænseværdier og WHO's retningslinjer for luftkvalitet.

EU's grænseværdier er gældende lovgivning i Danmark via implementering i danske bekendtgørelser. Miljøministeriet/Miljøstyrelsen har ansvaret for, at grænseværdierne overholdes. Såfremt grænseværdierne overskrides, skal der udarbejdes en luftkvalitetsplan, som anviser, hvordan og hvornår overskridelsen bringes til ophør. Grænseværdien for NO₂ er 40 µg/m³, 25 µg/m³ for PM_{2,5}, og 40 µg/m³ for PM₁₀.

Verdenssundhedsorganisation (WHO) har fremsat nogle retningslinjer for luftkvalitet (air quality guidelines). Disse retningslinjer er ikke juridisk bindende. WHO's retningslinjer er halvdelen af EU's grænseværdier for PM_{2,5} (dvs. 10 µg/m³) og PM₁₀ (dvs. 20 µg/m³), mens de er ens for NO₂ (40 µg/m³).

Da overskridelse af en grænseværdi primært skal være konstateret ved en målestation, og modelberegninger indgår som et supplerende værktøj til vurdering af luftkvaliteten, så kalder vi de beregnede overskridelser for indikative.

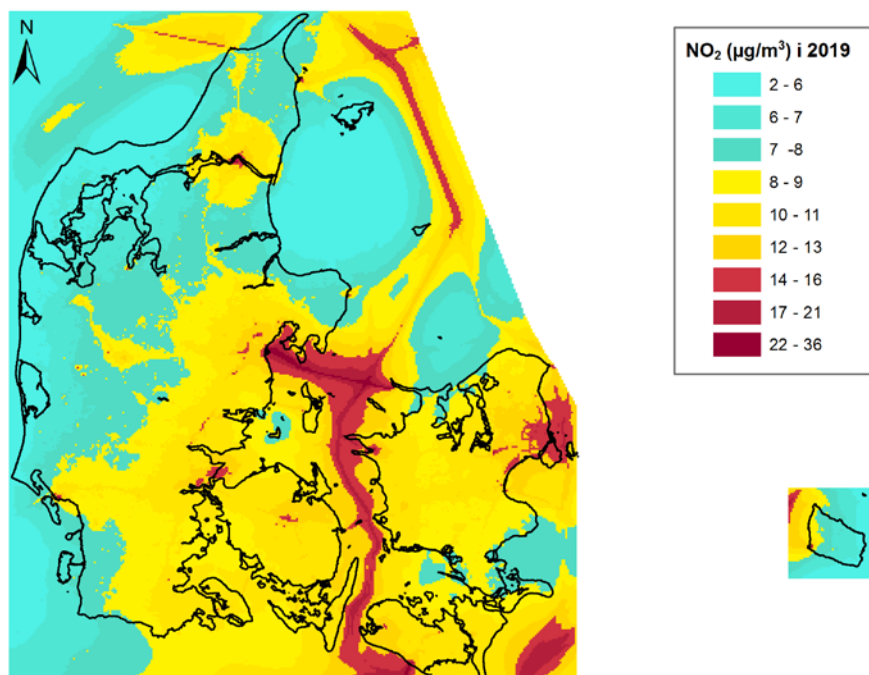
Der er ingen grænseværdier for BC og partikelantal.

5.1 Geografisk variation af NO₂

Baggrundskoncentrationer af NO₂

Den geografiske variation af årsmiddel af NO₂-baggrundskoncentrationer (DEHM/UBM) i 2019 er vist i Figur 5.1.

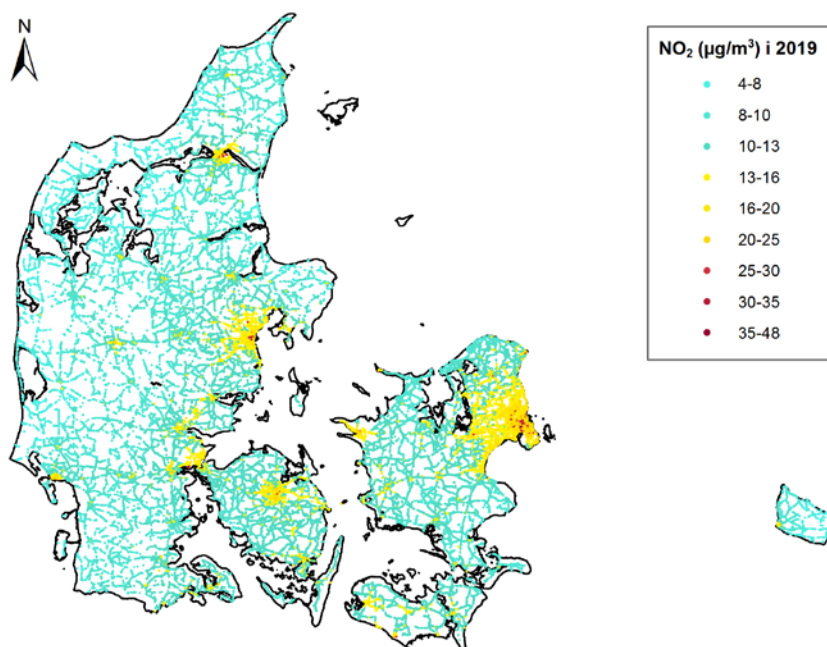
Ud over et regionalt bidrag, har lokale kilder tydelig indvirkning på den geografiske fordeling af baggrundskoncentrationer af NO₂ over land- og havområder. Vejtrafikkens bidrag ses klart som forhøjede koncentrationer i de større byer og langs store transportkorridorer. Skibsruterne med international skibstrafik gennem Storebælt og Kattegat sætter også sit tydelige præg med høje koncentrationer. Sidstnævnte giver også anledning til forhøjede koncentrationer i de tilstødende kystnære landområder. Molslinjen mellem Aarhus og Odden ses også tydelig.



Figur 5.1. Den geografiske variation af beregnet årsmiddel af NO₂-baggrundskoncentrationer med en opløsning på 1 km x 1 km i 2019.

Gadekoncentrationer af NO₂

Den geografiske variation af årsmiddel af NO₂-gadekoncentrationer (DEHM/UBM/AirGIS) i 2019 er vist i Figur 5.2. Der er et stort koncentrationsspænd fra omkring 4 til 48 µg/m³. Vejtrafikkens bidrag til den geografiske variation er tydelig med forhøjede koncentrationer i de større byer og langs store transportkorridorer.



Figur 5.2. Den geografiske variation af beregnet årsmiddel af NO₂-gadekoncentrationer på adresser i 2019 langs vejnettet for Landstrafikmodellen.

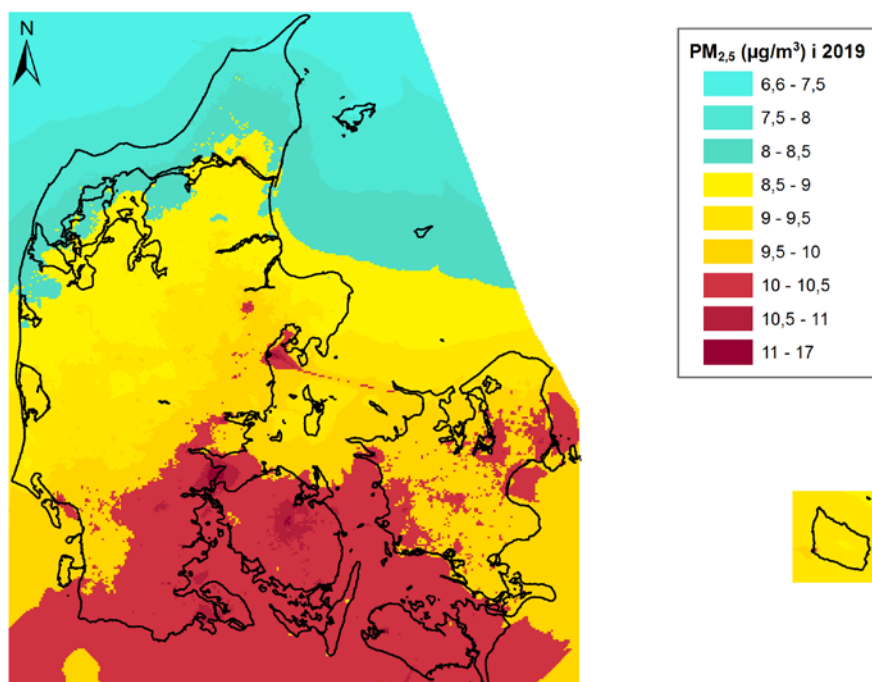
Der er beregnet 27 indikative overskridelser af grænseværdien for NO₂ med 24 i København og 3 i Aarhus. Grænseværdien for NO₂ som årsmiddelværdi er 40 µg/m³. Detaljeret analyse af de indikative overskridelser er i kapitel 6.

5.2 Geografisk variation af PM_{2,5}

Baggrundskoncentrationer af PM_{2,5}

Den geografiske variation af årsmiddel af PM_{2,5}-baggrundskoncentrationer i 2019 er vist i Figur 5.3.

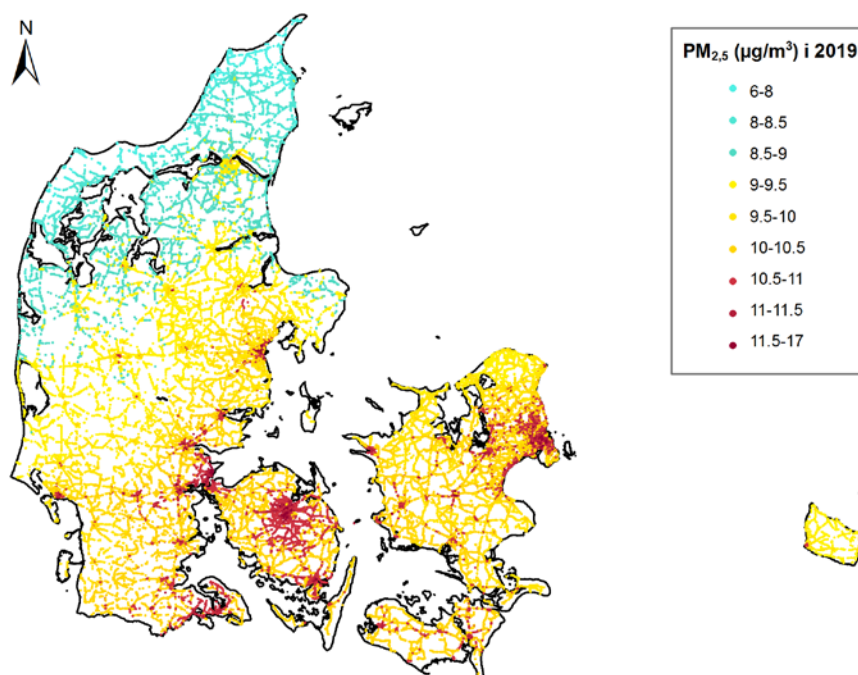
Den geografiske fordeling af baggrundskoncentrationer af PM_{2,5} har et andet mønster end NO₂, da der er en tydelig gradient fra syd til nord med højere PM_{2,5}-koncentrationer i det sydlige Danmark end i det nordlige Danmark. Dette skyldes, at PM_{2,5}-koncentrationer er domineret af regional baggrundsforurening fra Vest- og Centraleuropa.



Figur 5.3. Den geografiske variation af beregnet årsmiddel af PM_{2,5}-baggrundskoncentrationer med en opløsning på 1 km x 1 km i 2019.

Gadekoncentrationer af PM_{2,5}

Gradienten fra syd til nord genfindes også i gadekoncentrationerne af PM_{2,5}, men bidrag fra trafikerede gader ses også.



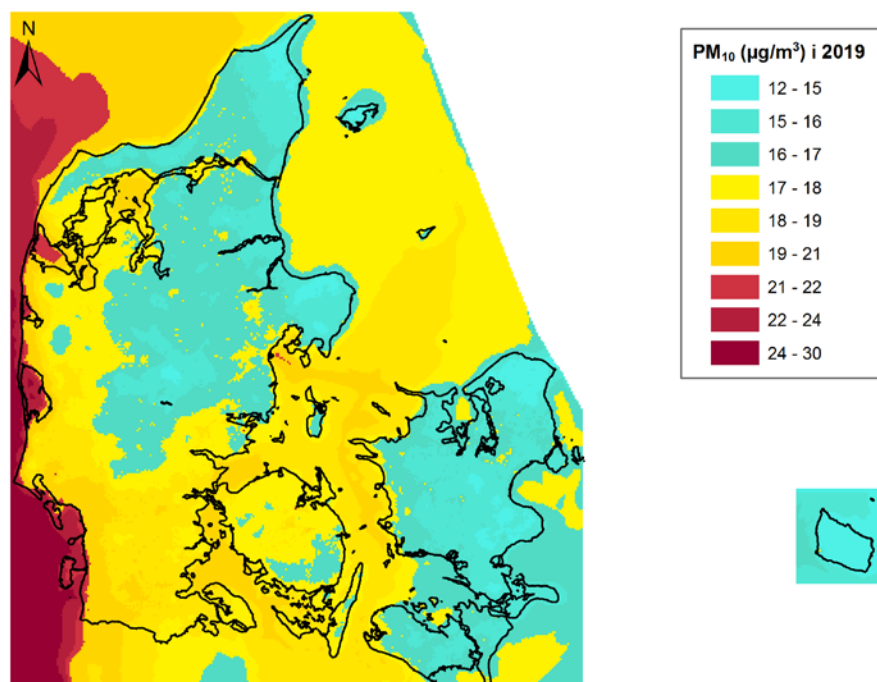
Figur 5.4. Den geografiske variation af beregnet årsmiddel af PM_{2.5}-gadekoncentrationer på adresser i 2019 langs vejnettet for Landstrafikmodellen.

5.3 Geografisk variation af PM₁₀

Baggrundskoncentrationer af PM₁₀

Den geografiske variation af årsmiddel af PM₁₀-baggrundskoncentrationer i 2019 er vist i Figur 5.5.

Den geografiske fordeling af baggrundskoncentrationer af PM₁₀ er tydeligt påvirket af bidrag af havsalt fra havsprøjt. Dette ses som høje PM₁₀-koncentrationer på Vestkysten af Jylland og i mindre grad på de vestlige kyster af øerne i de indre farvande. Dette skyldes den dominerende vestenvind. Der er også generelt høje koncentrationer i havområderne men aftagende fra Vesterhavet til Østersøen. Den samme gradient fra syd til nord, som for PM_{2.5}, er til dels også synligt for PM₁₀, da PM_{2.5} er en del af PM₁₀.

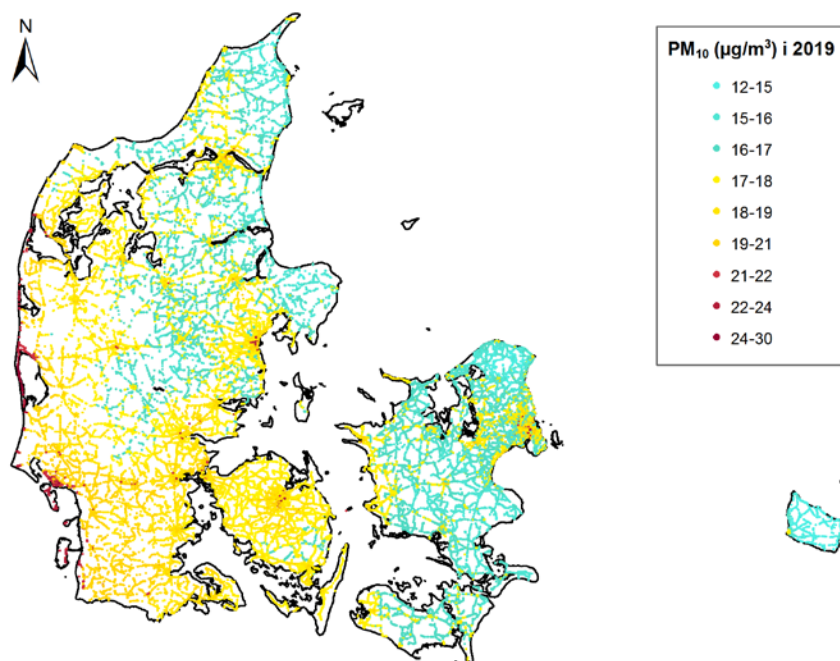


Figur 5.5. Den geografiske variation af beregnet årsmiddel af PM_{10} -baggrundskoncentrationer med en opløsning på 1 km x 1 km i 2019.

Gadekoncentrationer af PM_{10}

Den geografiske variation af årsmiddel af PM_{10} -gadekoncentrationer i 2019 er vist i Figur 5.6.

Den geografiske variation af gadekoncentrationer af PM_{10} er præget af variationen i baggrundskoncentrationerne, men bidrag fra vejtrafik viser sig også som højere koncentrationer i især de større byer.



Figur 5.6. Den geografiske variation af beregnet årsmiddel af PM_{10} -gadekoncentrationer på adresser i 2019 langs vejnettet for Landstrafikmodellen.

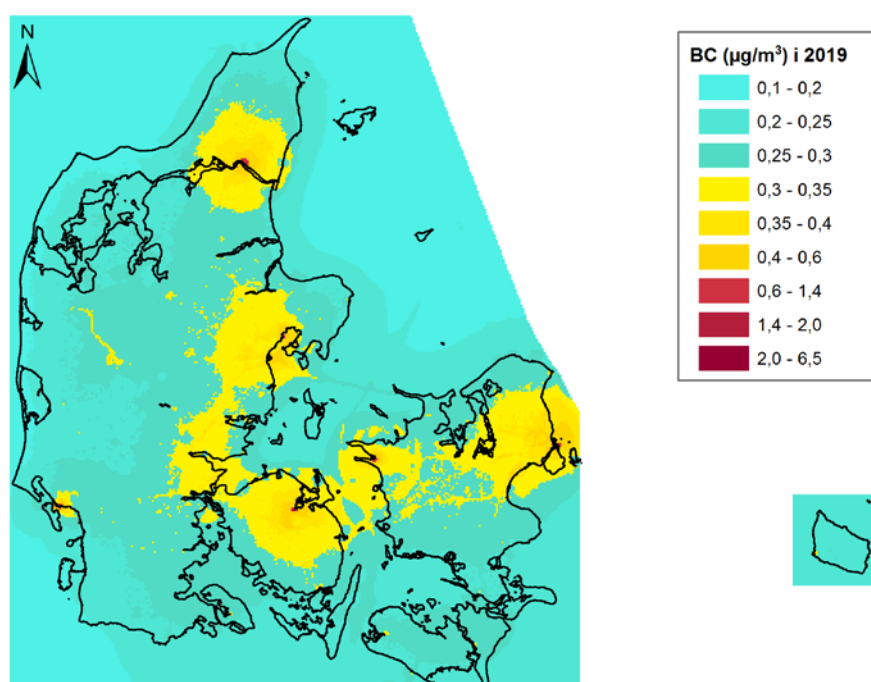
5.4 Geografisk variation af BC

Baggrundskoncentrationer af BC

Den geografiske variation af årsmiddel af BC-baggrundskoncentrationer i 2019 er vist i Figur 5.7.

Ud over et regionalt bidrag er den geografiske fordeling af baggrundskoncentrationer af BC domineret af forbrændingskilder fra vejtrafik, brændeovne, kraftværker, men også i et vist omfang fra skibstrafik. Forhøjede koncentrationer forekommer i og omkring de større byer.

Detaljeret analyse viser, at de højeste BC-koncentrationer forekommer i gitterceller med kraftværker eller store industrivirksomheder som Aalborg Portland. Det vil kræve mere detaljerede beregninger, fx med OML-modellen, for at evaluere om UBM beregner bidraget fra disse kilder korrekt.

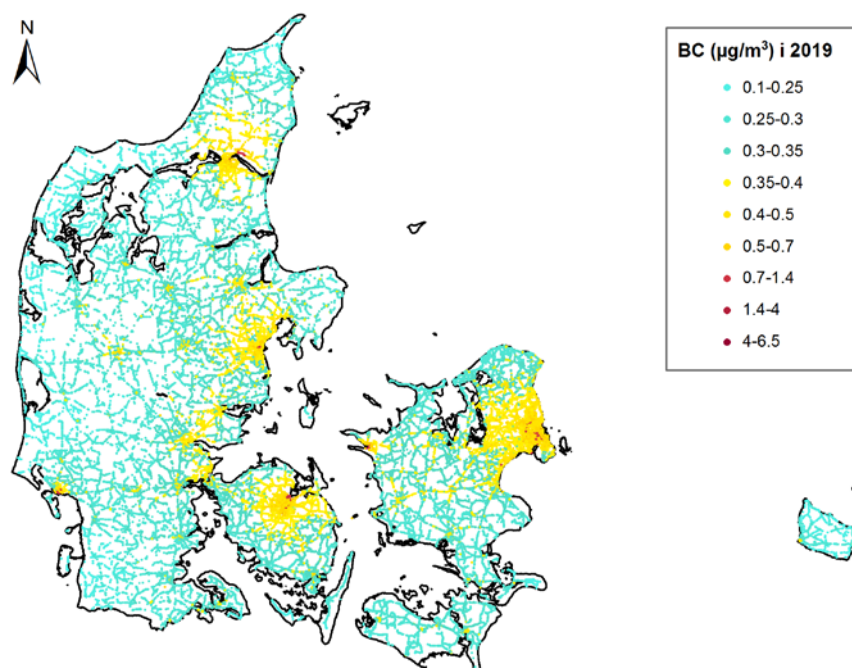


Figur 5.7. Den geografiske variation af beregnet årsmiddel af BC-baggrundskoncentrationer med en opløsning på 1 km x 1 km i 2019.

Gadekoncentrationer af BC

Den geografiske variation af årsmiddel af BC-gadekoncentrationer i 2019 er vist i Figur 5.8.

Som det fremgår, har baggrundskoncentrationen tydelig indflydelse på den geografiske variation af gadekoncentrationer, men herudover forekommer der også forhøjede BC-koncentrationer på trafikerede veje.

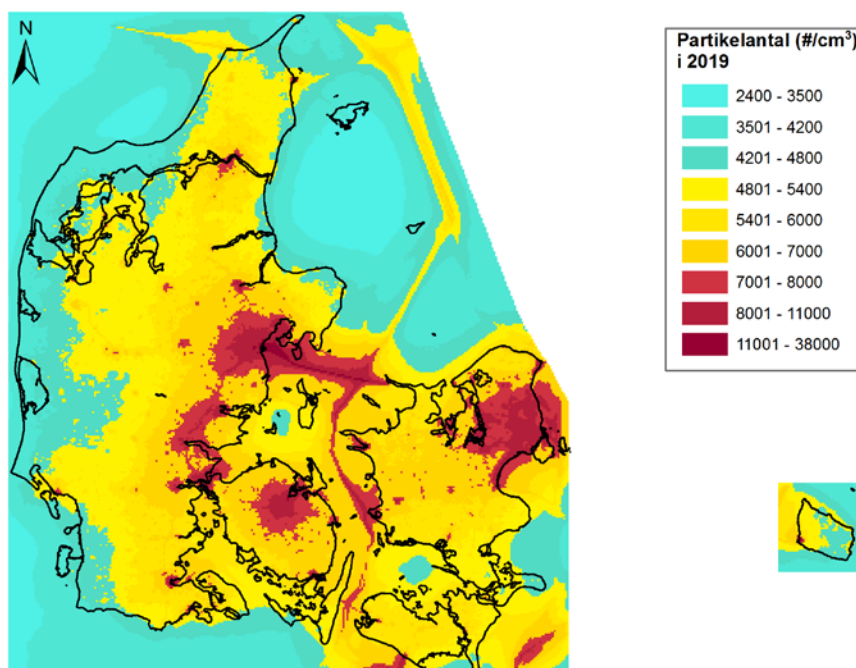


Figur 5.8. Den geografiske variation af beregnet årsmiddel af BC-gadekoncentrationer på adresser i 2019 langs vejnettet for Landstrafikmodellen.

5.5 Geografisk variation af partikelantal

Baggrundskoncentrationer af partikelantal

Den geografiske variation af årsmiddel af partikelantal for baggrundskoncentrationer i 2019 er vist i Figur 5.9. Den geografiske variation af partikelantal følger i høj grad NO_2 og til dels BC, og de vigtige kilder er skibstrafik, brændeoovne, vejtrafik og kraftværker.



Figur 5.9. Den geografiske variation af beregnet årsmiddel af baggrundskoncentrationer for partikelantal med en opløsning på 1 km x 1 km i 2019.

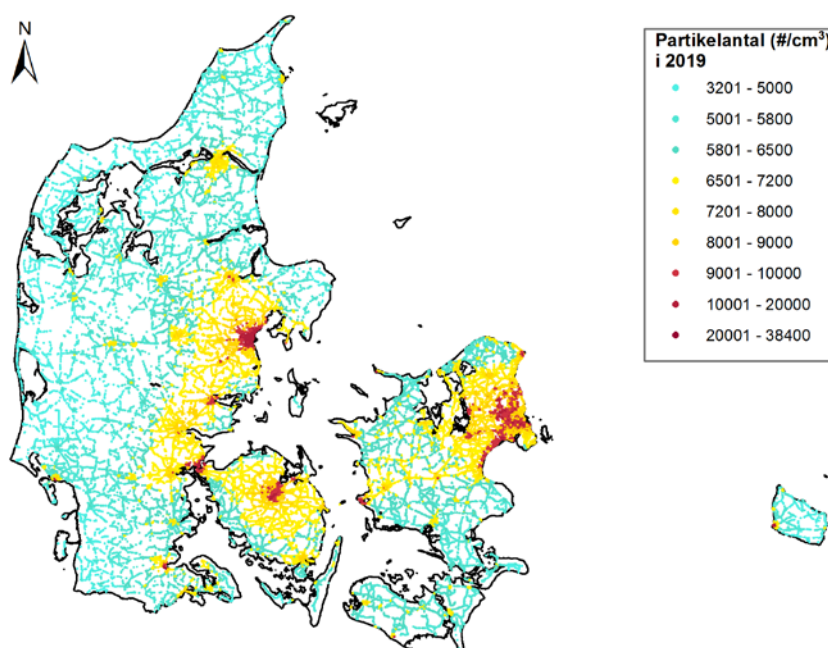
Som beskrevet i kapitel 4 er der stor usikkerhed på både niveauet og den geografiske fordeling, da modelsystemet overestimerer baggrundskoncentrationerne i forhold til de tilgængelige målinger fra baggrundstationer.

Gadekoncentrationer af partikelantal

Den geografiske variation af årsmiddel af partikelantal for gadekoncentrationer i 2019 er vist i Figur 5.10.

Den geografiske variation af baggrundskoncentrationerne betyder meget for variationen i gadekoncentrationerne, men det er også tydeligt, at der er forhøjede koncentrationer langs trafikerede veje.

Der er stor usikkerhed på både niveauet og den geografiske fordeling, da modelsystemet overestimerer baggrundskoncentrationerne og underestimerer gadebidraget i forhold til målingerne. Der er derfor mindre variation i det modellerede partikelantal på gadeniveau end målingerne viser.



Figur 5.10. Den geografiske variation af beregnet årsmiddel af gadekoncentrationer for partikelantal på adresser i 2019 langs vejnettet for Landstrafikmodellen.

5.6 Statistisk variation for de fem luftforurenende stoffer

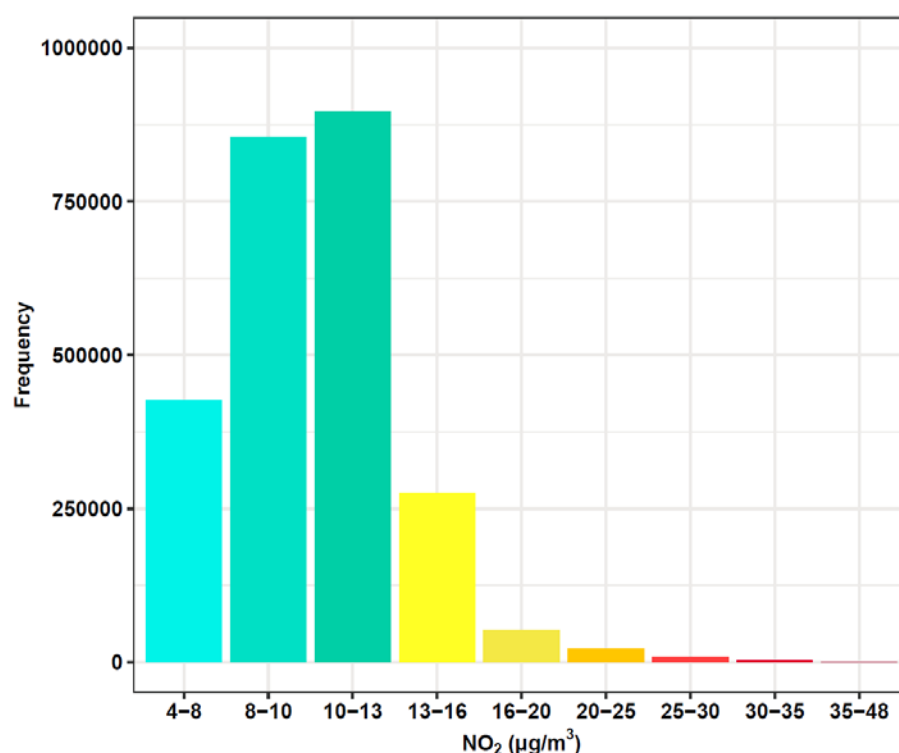
I det følgende præsenteres den statistiske variation for de fem luftforurenende stoffer. Dette gøres som histogrammer, hvor antallet af adresser, som ligger i forskellige koncentrationsintervaller, vises. Der er valgt samme intervalinddeling og farveskala som i ovenstående figurer for gadekoncentrationer.

I de efterfølgende histogrammer indgår samtlige 2.537.874 adresser, dvs. de 330.778 adresser langs vejnettet for Landstrafikmodellen baseret på DEHM/UBM/AirGIS samt de 2.207.096 adresser med baggrundskoncentrationer baseret på DEHM/UBM.

Statistisk variation for NO₂

Som det fremgår af Figur 5.11, er koncentrationsspændet fra omkring 4 til 48 µg/m³. Der er relativt få adresser i de højeste koncentrationsintervaller. Der er beregnet 27 indikative overskridelser over grænseværdien på 40 µg/m³,

som evalueres detaljeret i kapitel 6. WHO's retningslinjer ligger også på $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

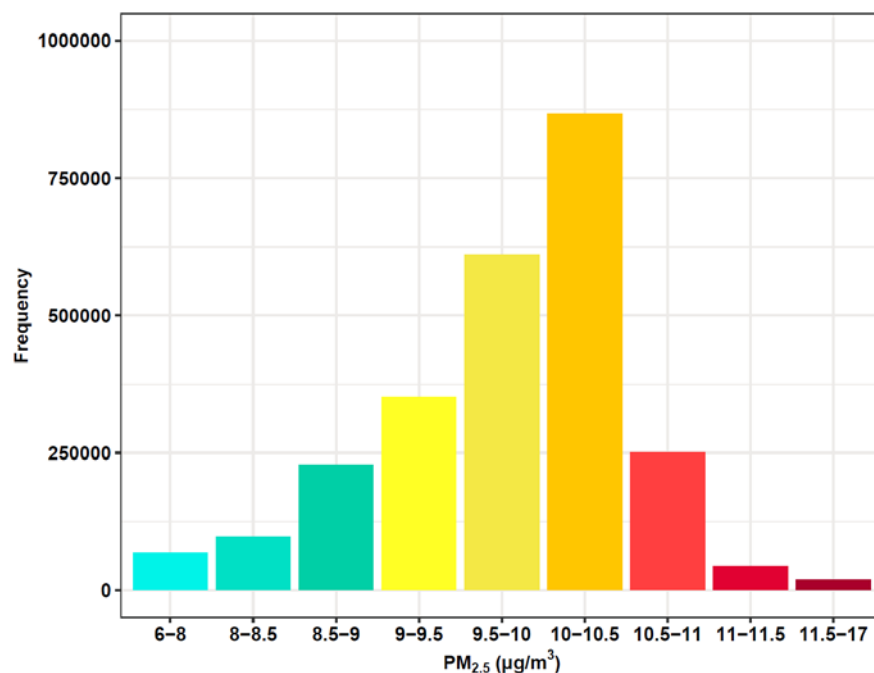


Figur 5.11. Histogram med antallet af adresser i forskellige NO_2 -intervalinddelinger i 2019.

Statistisk variation for $\text{PM}_{2.5}$

Som det fremgår af Figur 5.12 er spændet i $\text{PM}_{2.5}$ -koncentrationerne fra omkring 6 til $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En meget stor del af adresserne ligger i koncentrationsintervallet fra 9 til $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Beregnete niveauer er væsentligt under grænseværdien for årsmiddel af $\text{PM}_{2.5}$ på $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. WHO's retningslinje for $\text{PM}_{2.5}$ er $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, og den overskrides på mange adresser.

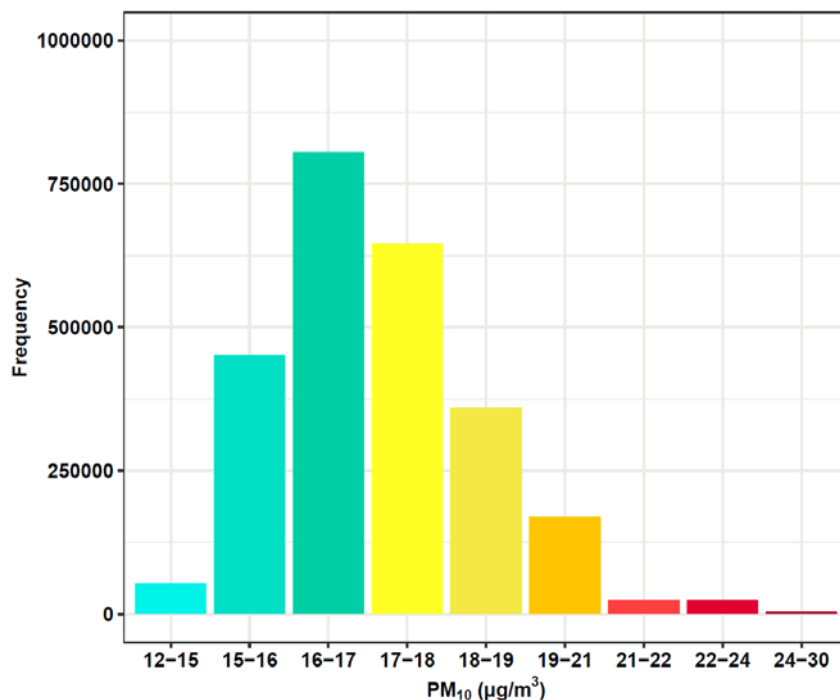


Figur 5.12. Histogram med antallet af adresser i forskellige PM_{2.5}-intervalinddelinger i 2019.

Statistisk variation for PM₁₀

Spændet i PM₁₀-koncentrationer er fra omkring 12 til 30 µg/m³, som det fremgår af Figur 5.13.

Koncentrationer over 21 µg/m³ er enten adresser langs Vestkysten påvirket af havsalt eller langs trafikerede gader. Beregnede niveauer er væsentligt under grænseværdien på 40 µg/m³ som årsmiddel for PM₁₀. WHO's retningslinje for PM₁₀ er 20 µg/m³, og den overskrides på en del adresser.



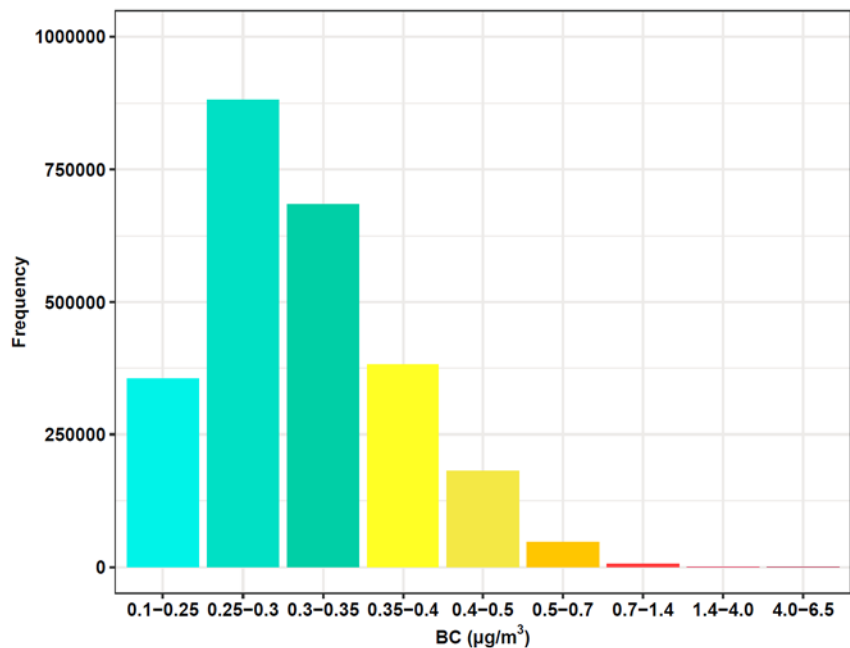
Figur 5.13. Histogram med antallet af adresser i forskellige PM₁₀-intervalinddelinger i 2019.

Statistisk variation for BC

Som det fremgår af Figur 5.14 er spændet i BC-koncentrationer fra omkring 0,1 til 6,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

BC-koncentrationen på en af Danmarks mest befærdede bygader på H.C. Andersens Boulevard er omkring 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, og de højeste BC-koncentrationer er på meget få adresser, som ligger helt tæt på kraftværker eller store industrikilder som Aalborg Portland.

Der findes ingen grænseværdier for BC.



Figur 5.14. Histogram med antallet af adresser i forskellige BC-intervalinddelinger i 2019.

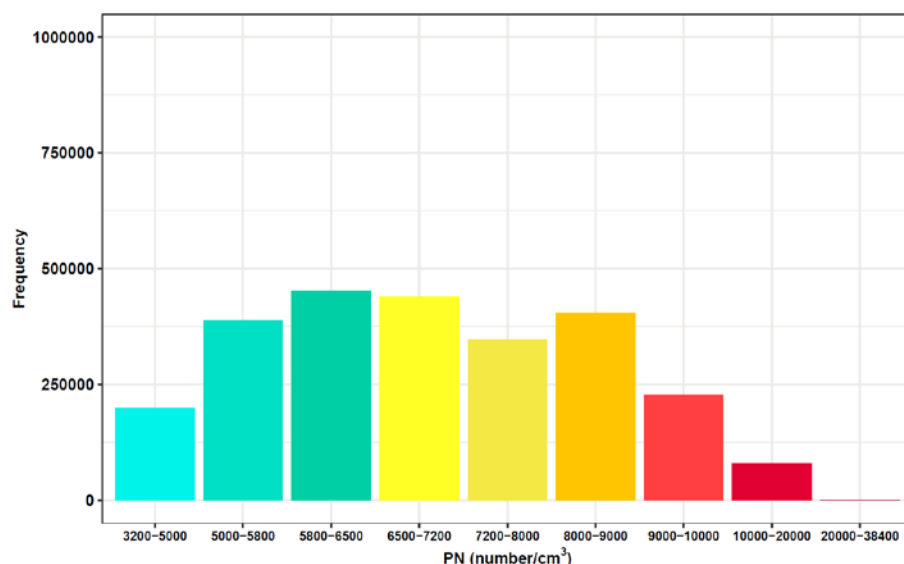
Statistisk variation for partikelantal

Spændet i partikelantal er fra omkring 3.200 til 38.400 (antal/ cm^3), som det fremgår af Figur 5.15. Der er meget få adresser over et partikelantal på 20.000.

Hyppigheden i klasserne her er relativt lige fordelt for 5000 – 9000.

Fordelingen er tilsyneladende mere flad, når man sammenligner med de andre stoffer, men det skyldes intervalinddelingen, og man kan ikke umiddelbart sammenligne på tværs af stofferne. Fordelingen mellem de forskellige stoffer er ikke så forskellig, hvis fordelingen plottes på en kontinuert skala uden intervalinddeling. Plottet på denne måde har partikelantal en top på omkring 7.000.

Der er ingen grænseværdier for partikelantal.



Figur 5.15. Histogram med antallet af adresser i forskellige intervalinddelinger for partikelantal i 2019.

Opsummering i forhold til grænseværdier og WHO's retningslinjer

I Tabel 5.1 er vist en opsummering af overskridelser af grænseværdier og WHO's retningslinjer.

Der er beregnet få indikative overskridelser af NO₂-grænseværdien og WHO's retningslinje, men de er sandsynligvis ikke reelle, da modelresultaterne overestimerer. Derfor er de markeret med lyse rødt.

Grænseværdien for PM_{2,5} og PM₁₀ overskrides ikke (grønne), mens WHO's retningslinjer for samme stoffer gør for mange adresser (røde).

Der er ingen grænseværdier eller WHO-retningslinjer for BC og partikelantal.

Tabel 5.1. Overskridelse i 2019 forhold til grænseværdier og WHO-retningslinjer

Luftforurening:	Grænseværdi	WHO's retningslinje	Overskridelse grænseværdi	Overskridelse WHO's retningslinjer
NO ₂	40 µg/m ³	40 µg/m ³		
PM _{2,5}	25 µg/m ³	10 µg/m ³		
PM ₁₀	40 µg/m ³	20 µg/m ³		
BC	Ingen	Ingen	n.a.	n.a.
Partikelantal	Ingen	Ingen	n.a.	n.a.

6 Indikative overskridelser af NO₂-grænseværdien i 2019

Grænseværdien for NO₂ som årsmiddelværdi er 40 µg/m³. Da grænseværdien er defineret som et heltal, vil der være en overskridelse, hvis værdien 40,5 µg/m³ overskrides. WHO's retningslinjer for luftkvalitet er ligeledes 40 µg/m³.

Da overskridelse af en grænseværdi primært skal være konstateret ved en målestation, og modelberegninger kun indgår som et supplerende værktøj til vurdering af luftkvaliteten, så kalder vi de beregnede overskridelser for indikative.

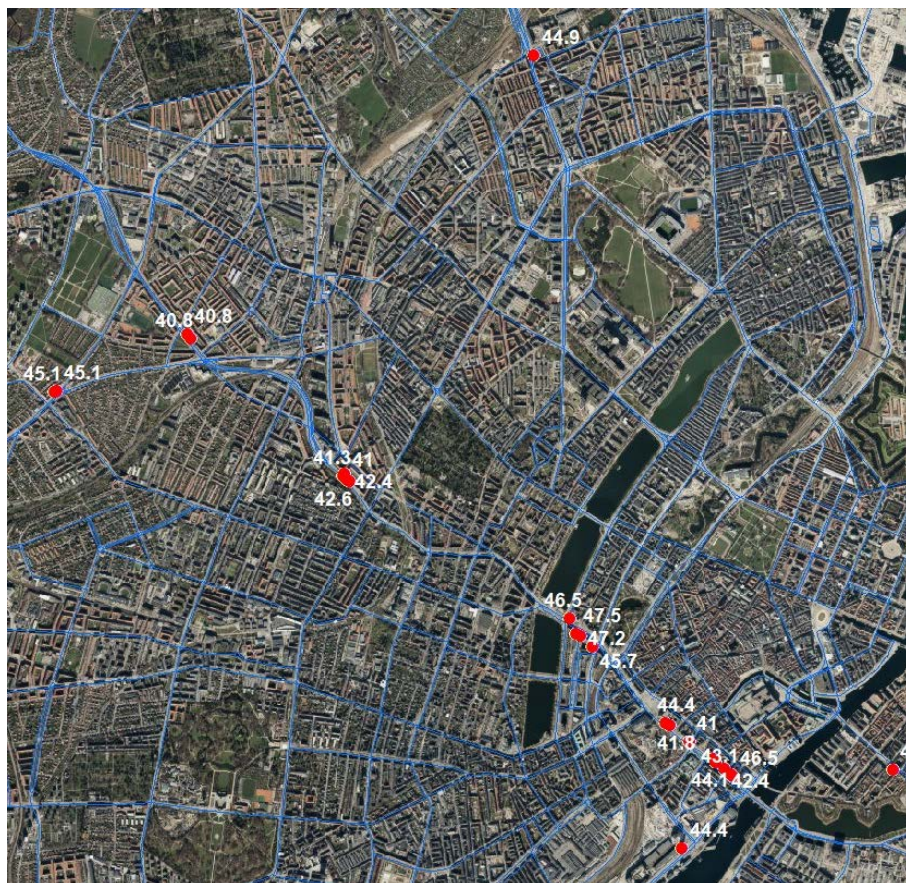
I 2019 er der i alt 27 adresser, som overstiger værdien 40,5 µg/m³, og dermed er indikative overskridelser af grænseværdien. Der er 11 adresser, hvor værdien er mellem 40,0 og 40,5 µg/m³.

Ud af de 27 indikative overskridelser af grænseværdien for NO₂ er der 24 i København og 3 i Aarhus.

Det der især bestemmer koncentrationen i OSPM er årsdøgntrafikken, rejsehastigheden, køretøjssammensætningen, gadebredden samt placering og højde af tilstødende bygninger i forhold til gadens orienteringen i forhold til nord. Jo højere årsdøgntrafik og mere tung trafik jo højere koncentrationer, jo lavere hastigheder jo højere koncentrationer, især under 50-60 km/t, jo smalere gadebredde jo højere koncentrationer, og jo højere og tættere randbebyggelse jo højere koncentrationer generelt. Men sammenhængen mellem bygninger og gadeorientering og gadekoncentrationer er kompleks. Hertil kommer baggrundsbidrag, som består af det regionale bidrag (DEHM) og bidraget fra øvrige lokale kilder inden for kortere afstand (UBM).

6.1 Indikative NO₂-overskridelser i København i 2019

Placering af de beregnede indikative overskridelser af NO₂-grænseværdien i København er vist i Figur 6.1. De beregnede koncentrationer ligger mellem 40,6 og 47,6 µg/m³.



Figur 6.1. Placering af 24 beregnede indikative overskridelser af NO₂ i København i 2019. Baggrundskort fra Kortforsyningen.

De beregnede overskridelser er langs med trafikerede hovedstrøg som H.C. Andersens Boulevard, Ågade, Borups Allé, Sallingvej, Kalvebod Brygge, Torvegade og Lyngbyvej. Det er forventeligt, at der modelleres høje NO₂-koncentrationer for disse strækninger, da de er meget trafikerede og har høj randbebyggelse.

Der er foretaget en detaljeret analyse af samtlige indikative overskridelser for at vurdere, om anvendt inputdata er realistisk.

På strækningen H.C. Andersens Boulevard er der adresser med beregnede overskridelser fra 41,0 til 46,5 µg/m³. Som det fremgik af forrige kapitel er den målte årsmiddel for NO₂ på 33 µg/m³ på H.C. Andersens Boulevard i 2019, mens beregnet årsmiddel er 39 µg/m³ i LPDV 2.0. Modellsystemet overestimerer også for øvrige gademålestationer samt også for baggrundsmålestationerne i overvågningsprogrammet. Overestimeringen er på omkring 18% på H.C. Andersens Boulevard. Da der måles 33 µg/m³ på målestationen på H.C. Andersens Boulevard, og modellsystemet overestimerer NO₂, vurderes der ikke at være reelle overskridelser af grænseværdien på H.C. Andersens Boulevard i 2019.

Et eksempel på en detaljeret analyse er vist i Figur 6.2 for Ågade på strækningen lige før Dronning Louises Bro.



Figur 6.2. Placering af fire beregnede indikative overskridelser for NO₂ på Ågade i 2019. Kortet viser også årsdøgntrafik på de veje, som er en del af Landstrafikmodellen (blå linjer). Baggrundskort fra Kortforsyningen.

For de fire beregnede overskridelser på Ågade er årsdøgntrafikken korrekt opgjort. Men gadebredden er kun opgjort til omkring 26 m, mens den skulle være omkring dobbelt så bred. Der er indsat en grænse for, hvor langt væk modsatbeliggende bygninger kan være for ikke at få urealistiske brede gader, men dette giver i dette eksempel en for small gadebredde. Det betyder også, at strækningen i beregningerne betragtes som en strækning med ensidig bebyggelse uden bygninger på den modsatte side. Da trafikken er stor og den anvendte gadebredde forholdsvis lille bliver de modellerede koncentrationer for høje.

I alle andre tilfælde vurderes trafikniveauet i Landstrafikmodellen og den beregnede gadegeometri at være repræsentativ for de faktiske forhold. Men da modelsystemet overestimerer NO₂, er det sandsynligt, at der ikke er tale om reelle overskridelser af grænseværdien på strækningerne.

6.2 Indikative NO₂-overskridelser i Aarhus i 2019

De er beregnet tre indikative overskridelser af NO₂-grænseværdien i Aarhus, som vist i Figur 6.3. De forekommer på Kystvejen overfor Navitas bygningen ved havnen og i krydset ved Kystvejen/Nørreport.



Figur 6.3. Placering af tre beregnede indikative overskridelser af NO₂-grænseværdien i Aarhus i 2019. Kortet viser også årstdøgntrafik på de veje, som er en del af Landstrafikmodellen (blå linjer). Baggrundskort fra Kortforsyningen.

De beregnede NO₂-koncentrationer er 43,2, 43,8 og 47,6 µg/m³.

For den højest modellerede koncentration på 47,6 µg/m³ er årstdøgntrafikken høj med 35.500 køretøjer pr. døgn, en lav rejsehastighed på 18 km/t og en gadebredde på 25 m. Der ser ikke ud til at være fejl i inputdata, og med de givne inputdata, bliver der derfor beregnet en høj koncentration. En grund til at koncentrationen bliver særlig høj er, at der er tale om en ensidig randbebyggelse, hvor koncentrationerne vil være høje uanset vindretning. I sammenligning med gader med randbebyggelse på begge sider, hvor der findes nogle vindretninger, hvor cirkulationen transporterer "frisk" luft ind til gaden. Ved den ensidige randbebyggelse skabes for vestlige vindretninger en recirkulering af luften i gaderummet, som vil føre emissionen fra bilerne mod facaden, og for østlige vindretninger vil emissionen fra biler blive ført direkte til facaden. På langs ad gaden føres bilernes emission til beregningsstedet. Bemærk, at Navitas bygningen ligger så langt fra facaden, at den ikke indgår i beregningerne, men kunne i virkeligheden godt have en indflydelse ved østlige vindretninger.

Den beregnede koncentration på 43,8 µg/m³ har samme inputdata for årstdøgntrafik og rejsehastighed, som ovenstående dog med en gadebredde på 28 m, hvorfor koncentrationen bliver lidt mindre.

Den beregnede koncentration på 43,2 µg/m³ har samme inputdata for årstdøgntrafik, rejsehastighed, gadebredde på 28 m, som ovenstående, koncentrationen er lidt mindre, da bygningshøjderne er lavere.

Da modelsystemet overestimerer for NO₂, er det sandsynligt, at der ikke er tale om reelle overskridelser af grænseværdien på denne strækning.

Ofte findes der meget komplekse situationer i den virkelige verden, hvor OSPM har sine begrænsninger. Hvis der er mistanke om overskridelser af grænseværdier i sådanne komplekse situationer kan det overvejes at anvende mere avancerede modelmetoder, fx CFD – Computational Fluid Dynamics – modeller.

6.3 Udvikling i indikative NO₂-overskridelser fra 2012 til 2019

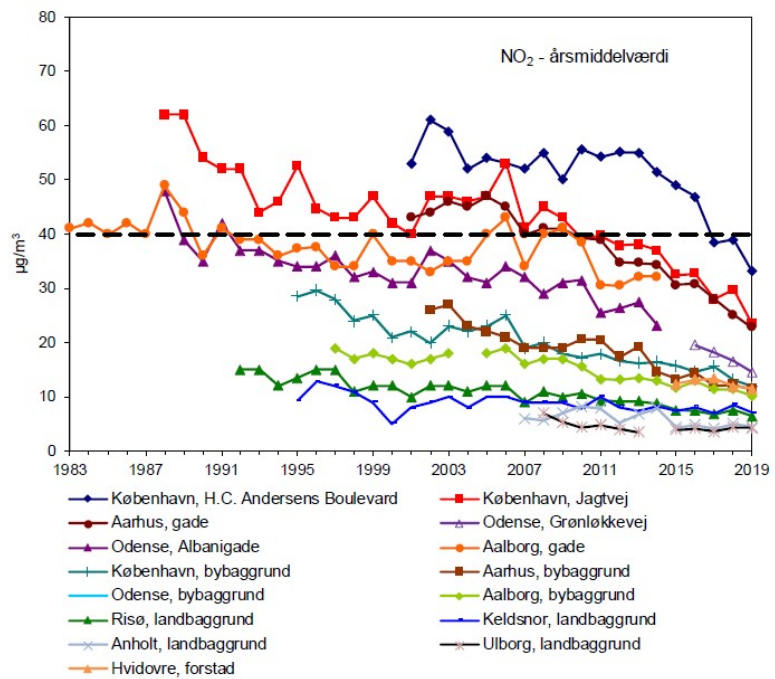
Nedenfor beskrives, hvordan antallet af beregnede indikative overskridelser er ændret fra 2012 til 2019. I 2012 blev der beregnet 1.123 indikative overskridelser af grænseværdien for NO₂. Der forekom kun overskridelser i København og omegn, Aarhus og Aalborg i 2012, se Tabel 6.1.

Tabel 6.1. Antal overskridelser af NO₂-grænseværdi i byerne i 2012 på adressepunkter

Kommune	Antal	Min. NO ₂ (µg/m ³)	Max. NO ₂ (µg/m ³)	Gns. NO ₂ (µg/m ³)
København	909	40,5	64,6	44,7
Frederiksberg	153	40,6	51,6	43,1
Hvidovre	3	41,0	42,0	41,6
Herlev	1	40,9	40,9	40,9
Aarhus Kommune	29	40,6	48,5	43,0
Aalborg Kommune	28	40,9	46,2	42,9
I alt	1.123			

I 2019 blev der beregnet 24 indikative overskridelser i København og 3 indikative overskridelser i Aarhus. Antallet af indikative overskridelser er således faldet drastisk fra 2012 til 2019. Endvidere er den beregnede maksimale koncentration også faldet fra 64,6 µg/m³ til 47,6 µg/m³.

Faldet i de modellerede koncentrationer og dermed også i antallet af beregnede indikative overskridelser er i overensstemmelse med det generelle fald i målte NO₂-koncentrationer på målestationerne i overvågningsprogrammet for luftkvalitet i Danmark, se Figur 6.4.



Figur 6.4. Udviklingstendens for årsmiddelværdier af NO₂ på alle målestationer i Danmark (Ellermann et al., 2021). For NO₂ angiver den stiplede linje EU's grænseværdi (EU, 2008). For indflydelse af omlægning af vejbanerne på H.C. Andersens Boulevard i 2010, som flyttede trafikken tættere på målestationen, samt genetablering af stationen i 2016 med samme afstand til trafikken som tidligere, se yderligere detaljer i Ellermann et al. (2020).

Referencer

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

Berkowicz, R., 2000b: A simple model for urban background pollution. *Environmental Monitoring and Assessment*, 65 (1/2), 259-267.

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.

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., 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.

CEIP, 2020: <https://www.ceip.at/webdab-emission-database>

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 (2020): <http://envs.au.dk/videnudveksling/luft/emissioner/air-pollutants/>

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., 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>

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, Jesper Nygaard og Jacob Klenø Nøjgaard. 2021. Luftkvalitet 2019. Status for den nationale luftkvalitetsovervågning. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 129 s. - Videnskabelig rapport nr. 410. <http://dce2.au.dk/pub/SR410.pdf>

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>

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>

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". (In review for Atmospheric Environment, May 2021).

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., Brandt, J., Becker, T., Fuglsang, M., Plejdrup, M.S., Winther, M., Ellermann, T., Christensen, J., Nielsen, O.K., Hertel, O., (2017a): Luften på din vej – nyt digitalt Danmarkskort for luftkvalitet. *Veje & Trafik*, Dansk Vejtidsskrift, Nr. 2-2017, februar 2017, s. 14-17.

Jensen, S.S., Ketzel, M., Becker, T., Christensen, J., Brandt, J., Plejdrup, M.S., Winther, M., Nielsen, O.-K., Hertel, O., Ellermann, T. (2017b): 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., Plejdrup, M.S., Hillig, K. (2019): GIS-based National Road and Traffic Database 1960-2020. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 25 pp - Technical Report No. 151. <http://dce2.au.dk/pub/TR151.pdf>

Jensen, S. S., Brandt, J., Ketzel, M., Ellermann, T., Nielsen, O.-K. Plejdrup, M.S., Winther, M., Andersen, M.S., Sigsgaard, T. (2021): Helbredseffekter af Black Carbon i Københavns Kommune. DCE-Nationalt Center for Miljø og Energi, 74s. - Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 430, <http://dce2.au.dk/pub/SR430.pdf>

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. (submitted).

Khan, J., Kakosimos, K., Raaschou-Nielsen, O., Brandt, J., Jensen, S.S., Ellermann, T., Ketzel, M. (2019): Development and Performance Evaluation of New AirGIS - A GIS Based Air Pollution and Human Exposure Modelling System. *Atmospheric Environment* 198 (2019) 102-121. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.036>.

Miljø- og fødevareministeriet, 2016: Bekendtgørelse om vurdering og styring af luftkvaliteten. Bekendtgørelse nr. 1233 af 30.09.2016 (In Danish). København, Danmark.

Nielsen, O-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Mikkelsen, M.H., Nielsen, M., Gyl-denkærne, S., Fauser, P., Albrektsen, R., Hjelgaard, K.H., Bruun, H.G. & Thomsen, M. 2020. Annual Danish Informative Inventory Report to UNECE. Emission inventories from the base year of the protocols to year 2018. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 559 pp. Scientific Report No. 369 <http://dce2.au.dk/pub/SR369.pdf>.

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.

Plejdstrup, M.S., Nielsen, O.-K., Gyldenkerne, S. & Bruun, H.G. 2018. Spatial high-resolution distribution of emissions to air – SPREAD 2.0. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 186 pp. Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy No. 131 <http://dce2.au.dk/pub/TR131.pdf>.

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

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 (2006): Trafiktællinger. Planlægning, udførelse og efterbehandling. Vejledning.

WHO Regional Office for Europe (2013). Health risks of air pollution in Europe—HRAPIE project: recommendations for concentration-response functions for cost-benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/health-risks-of-air-pollution-in-europe-hrapie-projectrecommmendations-for-concentrationresponse-functions-forcostbenefit-analysis-of-particulate-matter,-ozone-and-nitrogendioxide>

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

Bilag 1 Ordliste

Tabel B1.1. Ordliste over forkortelser for forskellige partikelbegreber og gasser

Forkortelse	Beskrivelse
BC	Black carbon.
EC	Elementært kulstof.
Manglende masse	Manglende partikelmasse, som er fundet ud fra forskellen mellem målinger og modelberegninger, og som formodes bl.a. at være vand bundet til partiklerne.
NH ₃	Ammoniak.
NO	Kvælstofmonoxid.
NO ₂	Kvælstofdioxid.
NO _x	Kvælstofoxider (NO+NO ₂).
O ₃	Ozon.
OC	Organiske kulstofforbindelser.
PAH	Tjærestoffer eller aromatiske kulbrinter (PAH - polyaromatiske hydrocarboner) er en fælles betegnelse for aromatiske forbindelser i kondenserende ringsystemer.
PM _{2,5}	Kaldes også fine partikler. Massen af partikler med diameter under 2,5 mikrometer. I DEHM indeholder PM _{2,5} således PPM _{2,5} , SIA, SOA, SS, og manglende partikelmasse.
PM ₁₀	Massen af partikler med diameter under 10 mikrometer.
PM ₁₀ – PM _{2,5}	Grove partikler, som er PM ₁₀ – PM _{2,5} . Er mekanisk dannede partikler som fx dæk- og vejslid eller fra naturlige kilder som fx jordstøv.
PPM _{2,5}	Direkte emitterede partikler. Massen af partikler under 2,5 mikrometer. I DEHM-modellen er det underopdelt i mineralsk støv, BC og OC.
SO ₂	Svovldioxid.
SOA	Sekundære organiske partikler.
SIA	Sekundært dannede uorganiske partikler (SIA) bestående af SO ₄ ²⁻ (sulfatpartikler), NO ₃ ⁻ (nitratpartikler) og NH ₄ ⁺ (ammoniumpartikler).
SS	Havsalt.
UFP	Ultrafine partikler med en diameter under 0,1 µm (eller 100 nm) betegnes ultrafine partikler. Da de er meget små og har lille masse, måles de oftest i antal frem for masse. Partikelmassen (vægten) af disse partikler betegnes PM _{0,1} .

Bilag 2 Generel beskrivelse af BC og partikelantal

I dette bilag gives en generel beskrivelse af partikler, og hvordan BC og partikelantal er en del heraf. Derefter beskrives, hvordan BC og partikelantal måles i Det nationale overvågningsprogram for luftkvalitet (NOVANA-programmet for luft).

BC og partikelantal som del af partikelforurening

Luftforurening er en kompleks størrelse, som omfatter gasser såvel som forureninger på partikelform.

Særligt partikelforureningen er en kompliceret størrelse. Luftbårne partikler kan være sammensat af diverse forskellige forbindelser i vidt forskellige blandingsforhold, og med helt forskellige former og størrelser. De kan bestå af væske eller fast stof, og de kan være alt fra kugle- og nåleformede (asbest er fx nåleformet) til uregelmæssige sammenhængende samlinger af mindre partikler. Både form og størrelse har betydning for partiklernes skæbne i miljøet, og ligeledes for deres effekt på helbred, miljø og klima.

Størrelsesfordelinger af partikler

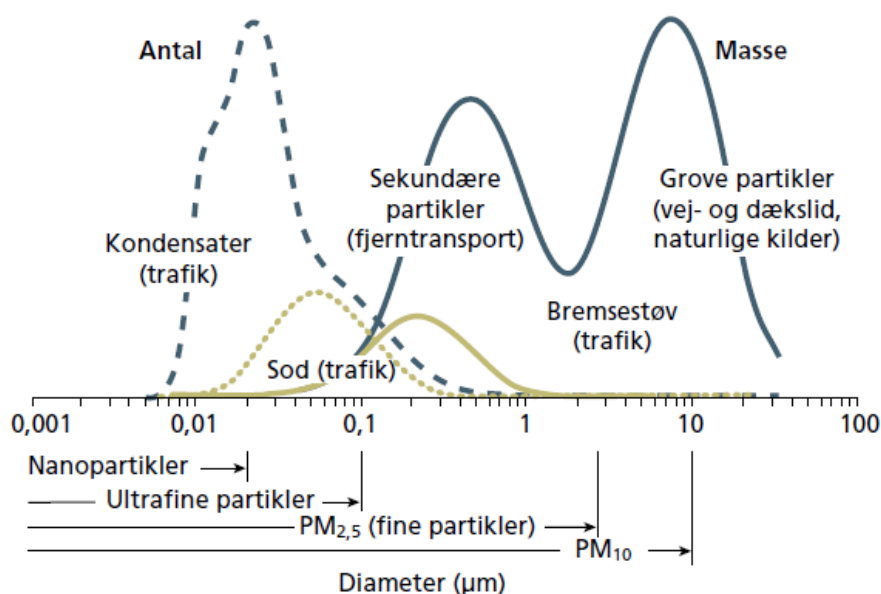
Det er klassisk i forhold til udendørs luftkvalitet at opdele partikler i en række (standard) størrelsesgrupper:

- De mindste partikler med en diameter under $0,1\ \mu\text{m}$ (eller $100\ \text{nm}$) betegnes ultrafine partikler, og massen (vægten) af disse partikler betegnes $\text{PM}_{0,1}$ (μm står for mikrometer, mens nm står for nanometer). Da massen af ultrafine partikler er meget lille, måles de oftest som antal, og ikke som masse.
- Partikler med en diameter under $2,5\ \mu\text{m}$ kaldes fine partikler, og massen (vægten) af disse partikler betegnes $\text{PM}_{2,5}$.
- Partikler med en diameter mellem $2,5$ og $10\ \mu\text{m}$ betegnes grove partikler. Massen (vægten) af de grove partikler er således PM_{10} minus $\text{PM}_{2,5}$, hvor PM_{10} er massen af partikler med en diameter under $10\ \mu\text{m}$. $\text{PM}_{2,5}$ er således indeholdt i PM_{10} . I forhold til ultrafine partikler indeholder $\text{PM}_{2,5}$ og PM_{10} meget større og tungere partikler, og derfor er det massen, som måles og ikke deres antal, da deres antal er meget lille i forhold til ultrafine partikler.

De ultrafine partikler har en kort opholdstid i atmosfæren (typisk sekunder til få minutter), da de hurtigt sætter sig på overfladen af andre partikler eller øvrige overflader, de kommer i kontakt med. Helt overordnet er opholdstiden af ultrafine partikler i luften således kort og i størrelsesordenen minutter. Det betyder fx, at ultrafine partikler udledt fra trafikken i en gade kun i begrænset omfang spredes væk fra gaden. Ser man på udledninger af ultrafine partikler fra fx en flymotor, så vil fortynding og afsætning på overflader betyde, at bidraget kun vil kunne forventes at være betydningsfuldt i kortere afstande fra kilden. De fine partikler kan til gengæld transporteres gennem luften over meget store afstande – over $1.000\ \text{km}$ – da de afsættes meget langsomt til jordoverfladen og kan opholde sig i atmosfæren op til 7 til 10 dage. Dog er det sådan, at sky- og regndråber er meget effektive til at fjerne de fine partikler fra atmosfæren, og efter selv korte byger er luften typisk stort set fuldstændig

renset for fine partikler. Denne fjernelse af partikler under nedbør er især vigtig for partikler i den fine fraktion, men også ultrafine og grove partikler fjernes med nedbøren. De grove partikler er så tilpas store (og dermed tunge), at tyngdekraften hurtigere fører dem ned til overfladen. Derfor har grove partikler en kortere opholdstid i atmosfæren.

Ser man på fordelingen af antallet af partikler i atmosfæren, så dominerer de direkte udledte ultrafine partikler; specielt tæt ved forbrændingskilder som fx vejtrafik. Til gengæld har disse partikler næsten ingen masse (vægt). Ser man til gengæld på vægten af de partikler, der er i luften, så dominerer de fine og grove partikler. Disse partikler er få i antal, men til gengæld er de tunge. De to måder at betragte partikelfordelingerne er illustreret i Figur B2.1, som viser en skematisk fordeling for en trafikeret gade i en by.



Figur B2.1. Typisk størrelsesfordeling af partikler i en trafikeret bygade. Bemærk at x-aksen er logaritmisk, og at der ikke er angivet en y-akse. Y-aksen kan være enten antallet af eller vægten af partikler i luften. De stiplede kurver viser således fordelingen af partikler målt som antal. De fuldt optrukne linjer angiver den samme fordeling, men i dette tilfælde for vægten af luftens indhold af partikler. De faktiske antal og den faktiske vægt vil variere fra gade til gade som funktion af primært trafik, meteorologi og gadens udformning. Sodpartikler fra trafikken (lysegrøn farve i figuren) har betydning for såvel vægten som det totale antal partikler i luften.

Primære og sekundære partikler

Ud over at man kan opdele partikler efter deres størrelse, så kan man ligeledes opdele dem efter oprindelse i såkaldt primære og sekundære partikler. De primære partikler er direkte udledte partikler, mens sekundære partikler dannes fra udledte gasser gennem fysiske og kemiske processer i atmosfæren.

En lang række menneskelige aktiviteter fører til udledning af *primære partikler* til atmosfæren. Det gælder fx vejtrafik, boligopvarmning (især brændefyring), men også energiproduktion og forskellige industrielle processer.

Selvom brændefyring finder sted i et begrænset tidsrum på året, så udgør det den største kildegruppe til direkte udledninger af partikler i den fine partikelfraktion (PM_{2,5}) i Danmark. Trods det at brændefyring udgør den største udledningskilde i Danmark, så udgør brændefyring ikke det største bidrag til

koncentrationen af fine partikler i luften, fordi langtransporteret luftforurening fra udlandet betyder meget for koncentrationsniveauerne i Danmark.

For vejtrafikken omfatter de primære partikler udledninger i form af udstødning men også ikke-udstødning, som er bremsesøv (metaller), slid fra dæk og vejbelægning og ophvirvlet støv fra vejen.

De *sekundære partikler* dannes blandt andet ved kemisk omdannelse af en række udledninger af gasser som SO_2 , NO_x og NH_3 . I atmosfæren omdannes gasserne til såkaldte sekundære partikler, som hovedsagelig er i den fine partikelfraktion. Det betyder, at udledninger af gasser fra for eksempel trafik og industri i landene mod syd bidrager til fine partikler i luften over Danmark.

Såvel primære som sekundære partikler kan ligeledes stamme fra naturlige kilder. De primære partikler kan således stamme fra havsprøjt, jordstøv, skov- og andre naturbrande, vulkanudbrud, men også udledninger fra planter og dyr etc. i form af pollen, svampesporer mm. De sekundære partikler kan dannes, når planter udsender en række flygtige organiske forbindelser, eller når havområder, skovbunde, moser, oversvømmede enge udleder gasser som kvælstofmonooxid og forskellige svovlforbindelser og organiske forbindelser.

Sodpartikler

Det man i daglig tale omtaler som sod er uforbrændt kulstof fra forbrændingsprocesser fx i en bil, brændeovn eller stearinlys. En ufuldstændig forbrænding er, når alt brændstoffet ikke bliver omdannet til CO_2 .

Sodpartikler er en del af de primære partikler, da de er direkte emitteret i forbindelse med forbrændingsprocesser. Forbrænding af brændsler, hvor kulstof indgår danner sodpartikler. Det gælder fx forbrænding af diesel og benzin i forbrændingsmotorer i køretøjer, forbrænding af jetbrændstof i en jetmotor, forbrænding af kul, gas eller biomasse i et kraftværk, forbrænding af træ i en brændeovn mv.

Som det fremgår af Figur B2.1 har sodpartikler fra trafikken både betydning for såvel vægten som det totale antal partikler i luften. Som masse har sodpartikler en top ved en diameter på omkring 0,15 mikrometer, og som antal en top omkring 0,05 mikrometer. Sodpartikler er således både en del af ultrafine partikler og fine partikler.

Sodpartikler er en del af BC, men BC stammer også fra andre kilder end forbrændingsprocesser, fx dækslid fra trafikken og kulstøv fra kullagring.

Måling af kulstofholdige partikler er ikke trivial og er i høj grad bestemt af målemetoden, som det fremgår af næste afsnit.

Måling af EC i luften

Elementært kulstof (EC) er den del af den luftbårne partikelforurening, som udgøres af kulstof alene. Elementært kulstof omtales også som Black Carbon (BC), fordi elementært kulstof er sort. Kemisk set er der stor forskel på de to betegnelser, da elementært kulstof er et veldefineret kemisk stof, som bestemmes ved en kemisk analyse af partiklerne. Black carbon er derimod et udtryk for farven på partiklerne, som bestemmes med en absorptionsmåling (måling af hvor meget farve partiklerne har). Ved en måling af black carbon måles

derfor i princippet alle de farvede partikelkomponenter, idet absorptionsmålingen ikke kan skelne mellem kulstof og fx brunlige partikelkomponenter. Black carbon kan omsættes til massen af black carbon pr. kubikmeter luft. Typisk vil der være god sammenhæng mellem de to forskellige målemetoder. EC kan derfor betragtes som en indikator for black carbon. Forholdet mellem EC og BC afhænger dog af lokaliteten, og der kan være relativt stor forskel mellem lokaliteter.

Måling af partikelantal i luften

Det nationale overvågningsprogram for luftkvalitet omfatter målinger af partikelantal, som er en parameter, der angiver den luftbårne forureningen med partikler i nanostørrelse. Disse partikler er så små, at de har meget lille masse, så derfor måles de ved tælling. Måleresultaterne, der præsenteres i 2019 (Ellermann et al., 2021), dækker partikler i størrelsen af 41 til 478/550 nm. Bemærk, at resultaterne ikke omfatter partikler mindre end 41 nm, hvilket skyldes tekniske problemer på de nyligt erhvervede instrumenter (fejlen er rettet i 2020). Årsagen til angivelsen af to øvre grænser er, at de gamle og nyerhvervede 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).

Der er også i perioden frem til midten af 2017 målt partikelantal med et andet instrument (DMPS), som tæller alle partikler over 10 nm. Da modellens output for partikelantal vurderes at svare bedst til partikler over 10 nm, er modelresultaterne sammenlignet med disse målinger. Målinger af antal partikler over 10 nm er omkring dobbelt så høje som målinger i området 41 til 478/550 nm. Antallet af partikler er derfor meget følsom overfor især afskæringspunkt i den lave ende af størrelsesspektret.

LUFTEN PÅ DIN VEJ 2.0

Rapporten beskriver Luften på din vej 2.0, som er en opdateret version med beregnet luftkvalitetsdata for 2019, mod tidligere 2012 i version 1.0. Modellsystemet anvendt til beregning af luftkvaliteten i 2012 og 2019 på alle adresser i Danmark og de anvendte input data er bekræftet med vægt på 2019 data. Den beregnede luftkvalitet i 2019 er illustreret på kort og beskrevet statistisk. Der er lavet en detaljeret analyse af beregnede indikative overskridelser af grænseværdien for NO_2 i 2019, og udviklingen siden 2012 i antal overskridelser er også vist. Beregningerne er endvidere sammenlignet med målinger i 2019 fra det nationale overvågningsprogram for luftkvalitet for at vurdere usikkerheden på modelberegningerne. I 2012 indgik NO_2 (kvælstofdioxid), $\text{PM}_{2,5}$ (partikler under 2,5 mikrometer) og PM_{10} (partikler under 10 mikrometer), og som noget nyt indgår tillige BC (Black carbon) og partikelantal i 2019.