

# Emissionskonsekvenser af modeller for etablering af miljøzoner for mobile ikke-vejgående arbejdsmaskiner

M. Winther, A.S. Lansø, M.S. Plejdrup

*Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet, Roskilde, Danmark*

*Emneord: NO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub>, miljøzoner, arbejdsmaskiner*

*Korresponderende forfatter email: [mwi@envs.au.dk](mailto:mwi@envs.au.dk)*

---

## Abstrakt

Emissionskonsekvenserne af at indføre miljøzoner for arbejdsmaskiner i Danmark er beregnet for årene 2025, 2027 og 2030 med DCE's non-road emissionsmodel (DEMOS-NRMM). Beregningerne er udført for fire forskellige miljøzoneområder (a)-(d), og miljøscenarier med krav til enten maskinernes emissionsnorm eller afgiftsbetaling. Scenariernes bestandsfordelinger på EU-emissionstrin er bestemt af COWI i et forudgående projekt bl.a. ud fra DCE's bestandsdata og analyser af virksomhedernes maskinvalg i de forskellige scenarier.

NO<sub>x</sub> og PM<sub>2.5</sub> basisemissionerne beregnet for arbejdsmaskiner i det samlede geografiske område (b+c+d) er ganske små, og udgør mellem 6 % og 7 % af den nationale basisemission i alle årene 2025, 2027 og 2030. De største NO<sub>x</sub> og PM<sub>2.5</sub> emissionsreduktioner opnås i Scenarie 1.A i 2025 hvor kun stage V maskiner bruges. Emissionsreduktionerne er størst for PM<sub>2.5</sub>. For PM<sub>2.5</sub>[NO<sub>x</sub>] beregnes i 2025 en emissionsreduktion på 93 % [14 %], 88 % [12 %], 79 % [11 %] og 76 % [9 %] for hhv. Scenarie 1.A, 1.B, 3.A og 3.B ift. til basisemissionen i det samlede område (b+c+d). Pga. den naturlige udskiftning til stage V maskiner i basisbestanden falder især basisemissionerne af PM<sub>2.5</sub> markant frem mod 2030, og PM<sub>2.5</sub> emissionseffekterne af at indføre miljøzoner bliver derfor også gradvist mindre. PM<sub>2.5</sub>[NO<sub>x</sub>] basisemissionerne falder med 67 % [11 %] fra 2025 til 2030. For scenarie 1.A stiger PM<sub>2.5</sub> emissionen med 4 %, mens NO<sub>x</sub> emissionen falder med 2 %. For scenarie 1.B, 3.A og 3.B falder PM<sub>2.5</sub>[NO<sub>x</sub>] emissionerne med hhv. 28 % [4 %], 33 % [3 %] og 46 % [5 %] fra 2025 til 2030.

Arbejdsmaskinernes emissionsbidrag til NO<sub>2</sub>- og PM<sub>2.5</sub>-bybaggrundskoncentrationerne udgør i basis hhv. 1,25 % og 0,05 % af de årlige målte bybaggrundskoncentrationer i København. De lavere emissioner fra arbejdsmaskiner vil nedbringe de årlige bybaggrundskoncentrationer for NO<sub>2</sub> med 0,2 % i både scenarie 1.A og 3.A, og for PM<sub>2.5</sub> med hhv. 0,04 % og 0,03 % i scenarie 1.A og 3.A. Emissionsbidraget fra arbejdsmaskiner til spidsværdien for NO<sub>2</sub>-koncentrationen (19. største timemiddelværdi) og PM<sub>2.5</sub>-koncentrationen (4. største døgnmiddelværdi) i København og Frederiksberg i 2025 udgør i basis hhv. 13,2 % og 0,2 % af den højeste målte timemiddelværdi for NO<sub>2</sub> og den 4. største døgnmiddelværdi for PM<sub>2.5</sub> i bybaggrund. De lavere bidrag fra arbejdsmaskiner til spidsværdien af NO<sub>2</sub>-koncentrationen vil give reduktioner på 1,8 % og 1,4 % af den højeste målte timemiddelværdi i bybaggrund for hhv. scenarie 1.A og 3.A. For PM<sub>2.5</sub> reduceres den 4. største døgnmiddelværdi i bybaggrundskoncentrationen med hhv. 0,18 % og 0,14 % i scenarie 1.A og 3.A.

## 1. Indledning

Som følge af den politiske aftale ”Miljøinitiativer i grønne byer og en hovedstad i udvikling” (Miljøministeriet, 2021) har Miljøministeriet iværksat en todelt analyse af at indføre miljøzoner for mobile ikke-vejpgående arbejdsmaskiner i Danmark. I første del af analysen har den rådgivende ingeniørvirksomhed COWI undersøgt adfærdsændringer, påvirkningsgrader og erhvervsøkonomiske konsekvenser for større virksomheder og små og mellemstore virksomheder ved etablering af miljøzoner inden for fire forskellige geografiske afgrænsninger og med forskellige emissionskrav defineret i scenarier (Cowi, 2023). I anden del af analysen har DCE (Nationalt Center for Miljø og Energi) under Aarhus Universitet beregnet miljøzonernes konsekvenser for emissioner og luftkvalitet (Lansø et al., 2023).

De undersøgte miljøzoner er afgrænset geografisk på følgende måde:

(a) Miljøzoner i de nuværende miljøzoner for vejtrafik. Miljøzonerne omfatter København/Frederiksberg, Aarhus, Aalborg og Odense. I København og Frederiksberg dækker miljøzonen hele kommunen. I de tre øvrige byer udgør miljøzonen en mindre del af byzonen.

(b) De nuværende miljøzoner (a) udvides med Københavns omegnskommuner: Albertslund, Ballerup, Brøndby, Furesø, Gentofte, Gladsaxe, Glostrup, Greve, Herlev, Hvidovre, Ishøj, Lyngby-Taarbæk, Rudersdal, Rødovre, Tårnby og Vallensbæk. For omegnskommunerne dækker miljøzonen hele kommunen.

(c) Miljøzoner i byer over 50.000 indbyggere, der omfatter Esbjerg, Randers, Kolding, Horsens, Vejle, Roskilde og Herning. Miljøzonen udgør en mindre del af byzonen.

(d) Miljøzoner i byer over 25.000 indbyggere, der omfatter Silkeborg, Hørsholm, Helsingør, Næstved, Viborg, Fredericia, Køge, Holstebro, Tåstrup, Slagelse, Hillerød, Holbæk, Sønderborg, Svendborg og Hjørring. Miljøzonen udgør en mindre del af byzonen.

Miljøzonescenarierne kan kortfattet beskrives på følgende måde. I scenarie 1 indføres et krav om at alle arbejdsmaskiner, der bruges inden for miljøzonen mindst lever op til EU’s emissionsnorm stage V (scenarie 1.A) eller de mindre skrappe stagekrav IIIB/IV (scenarie 1.B). I scenarie 2 indføres miljøzoner med samme stagekrav som i scenarie 1, men med mulighed for at bruge en maskine i miljøzonen, der har fået eftermonteret et partikelfilter (scenarie 2.A og 2.B). I scenarie 3 indføres miljøzoner med samme stagekrav som i scenarie 1, men med mulighed for at bruge en maskine i miljøzonen, der ikke lever op til de gældende stagekrav, mod at betale en afgift (scenarie 3.A og 3.B).

I dette paper forklares  $\text{NO}_x$  og  $\text{PM}_{2.5}$  emissionskonsekvenserne for scenarierne 1 og 3 inden for hver miljøzone a-d og samlet for alle miljøzoner. Emissionerne beregnes for årene 2025, 2027 og 2030.

## 2. Metode

Til brug for emissionsberegningerne er nationale prognosedata for bestanden af arbejdsmaskiner og antal årlige driftstimer samt emissionsfaktorer hentet fra DCE’s non road emissionsmodel (DEMOS-NRMM) for årene 2025, 2027 og 2030 (Winther, 2022).

### Bestandsdata og årlige driftstimer

Bestandsdata er opdelt pr. maskintype, motorstørrelse og EU emissionstrin inden for brancherne byggeri, anlæg, fremstillingsvirksomhed og handel og service.

Procentdelen af den nationale bestand pr. maskintype (og branche) der bruges i de fire miljøzoneområder er bestemt af Cowi (2023) ud fra den arealfordelte aktivitet med arbejdsmaskiner pr. branche beregnet med DCE's GIS baserede SPREAD model (Plejdrup et al., 2021). Arealfordelingen af aktiviteten for Danmark viser at kun en lille andel af den samlede nationale bestand af arbejdsmaskiner bruges i miljøzonerne. For miljøzonerne a, b, c og d udgør procentandelene af maskiner hhv. 5,4 %, 9,2 %, 1,4 % og 2,7 % af den samlede danske bestand.

Tabel 1 Antal arbejdsmaskiner i Danmark pr. branche og maskintype for årene 2025, 2027 og 2030, %-del af maskinerne der bruges inden for de fire miljøzoner og %-del af disse maskiners årlige driftstimer der leveres inden for de fire miljøzoner (ens for alle år)

Branche	Maskintype	Antal maskiner, Danmark			%-del bestand i miljøzone				%-del timer i miljøzone af bestand i miljøzone (kun små og mellemstore virksomheder)			
		2025	2027	2030	(a)	(b)	(c)	(d)	(a)	(b)	(c)	(d)
Bygge og anlæg	Affaldskompaktorer	169	169	169	2,9	5,1	0,9	1,7	100	100	100	100
Bygge og anlæg	Dumpere	1223	1252	1277	3,6	6,2	1,1	2,1	13	35	9	9
Bygge og anlæg	Fejemaskiner o.l.	339	339	338	2,9	5,1	0,9	1,7	100	100	100	100
Bygge og anlæg	Gaffeltrucks (diesel)	121	116	111	6,4	11,6	1,6	3,2	21	23	10	13
Bygge og anlæg	Generator	8460	8460	8460	5	8,9	1,4	2,7	18	27	10	12
Bygge og anlæg	Grave/læssesmaskiner	2163	1945	1743	5	8,9	1,4	2,7	18	27	10	12
Bygge og anlæg	Gummihjulslæssere (> 5,1 tons)	3841	3973	4093	5	8,9	1,4	2,7	18	27	10	12
Bygge og anlæg	Gummihjulslæssere (0-5 tons)	4867	4899	4724	5	8,9	1,4	2,7	18	27	10	12
Bygge og anlæg	Hydr. gravemaskiner på bånd (> 5,1 tons)	4278	4403	4490	5	8,9	1,4	2,7	18	27	10	12
Bygge og anlæg	Hydr. gravemaskiner på bånd (0-5 tons)	7966	7893	7526	5	8,9	1,4	2,7	18	27	10	12
Bygge og anlæg	Hydr. gravemaskiner på hjul	489	503	516	5	8,9	1,4	2,7	18	27	10	12
Bygge og anlæg	Højtryksrensere	84	84	85	5	8,9	1,4	2,7	18	27	10	12
Bygge og anlæg	Kompressor	8460	8460	8460	5	8,9	1,4	2,7	18	27	10	12
Bygge og anlæg	Larvebåndsdozere	172	171	172	3,6	6,2	1,1	2,1	13	35	9	9
Bygge og anlæg	Larvebånds-læssere	17	15	15	3,6	6,2	1,1	2,1	13	35	9	9
Bygge og anlæg	Minilæssere	796	736	688	5	8,9	1,4	2,7	18	27	10	12
Bygge og anlæg	Motorgrader	170	169	169	0	0	0	0				
Bygge og anlæg	Personlifte	254	253	254	2,9	5,1	0,9	1,7	100	100	100	100
Bygge og anlæg	Pumper	1692	1692	1692	5	8,9	1,4	2,7	18	27	10	12
Bygge og anlæg	Teleskoplæssere	1483	1556	1630	5	8,9	1,4	2,7	18	27	10	12
Bygge og anlæg	Traktorer (bygge og anlæg)	1196	1164	1127	5	8,9	1,4	2,7	18	27	10	12
Bygge og anlæg	Tromler og stampere	4738	4738	4738	3,6	6,2	1,1	2,1	13	35	9	9
Bygge og anlæg	Vejbaneudlæggere	508	508	508	3,6	6,2	1,1	2,1	13	35	9	9
Fremstillingsvirk.	Gaffeltrucks (diesel)	1154	1097	1052	7,5	12,3	0	0	100	100		
Fremstillingsvirk.	Teleskoplæssere	445	470	490	7,5	12,3	0	0	100	100		
Fremstillingsvirk.	Traktorer (fremstillingsvirksomhed)	537	520	505	7,5	12,3	0	0	100	100		
Handel og service	Gaffeltrucks (diesel)	2931	2788	2675	2,3	5,1	0,5	0,9	100	100	100	100
Handel og service	Teleskoplæssere	283	297	306	2,3	5,1	0,5	0,9	100	100	100	100
Handel og service	Traktorer (handel og service)	8185	7926	7692	10,1	14,9	2,7	4,8	19	44	12	9
Alle	Alle	67021	66596	65705	5,4	9,2	1,4	2,7	25	36	15	16

Der er et geografisk overlap på 30 % mellem miljøzone c (store provinsbyer) og miljøzone b (de nuværende miljøzoner for vejtrafik samt Københavns omegnskommuner), og 55 % mellem miljøzone d (små provinsbyer) og miljøzone c (store provinsbyer), jf. Cowi (2023). Det geografiske overlap er vigtigt at bemærke, når de endelige emissionsresultater vurderes. Isoleret set kan de samlede emissioner opgøres for hver enkelt miljøzone, men for alle miljøzoner indført på samme tid bliver de samlede emissioner summen af emissionerne for de enkelte miljøzoner, fratrukket delbidrag på hhv. 30 % og 55 % af emissionerne for miljøzone b og c.

Figur 1 viser bestanden af arbejdsmaskiner i 2025 for det samlede miljøzoneområde (b+c+d) fordelt på EU stagekrav både i basissituationen uden miljøzoner og for de fire scenarier. Øverste delfigur viser bestandsfordelingen for alle virksomheder, og de midterste og nederste delfigurer viser bestandsfordelingen for større virksomheder og små og mellemstore virksomheder.

I scenarie 1.A er der kun Stage V maskiner inden for miljøzonerne (jf. beskrivelsen i afsnit 1). Større virksomheder har mulighed for at substituere maskiner ældre end Stage V med Stage V maskiner inden for virksomhedens maskinpark, mens små og mellemstore virksomheder er nødsaget til at købe en ny Stage V maskine.

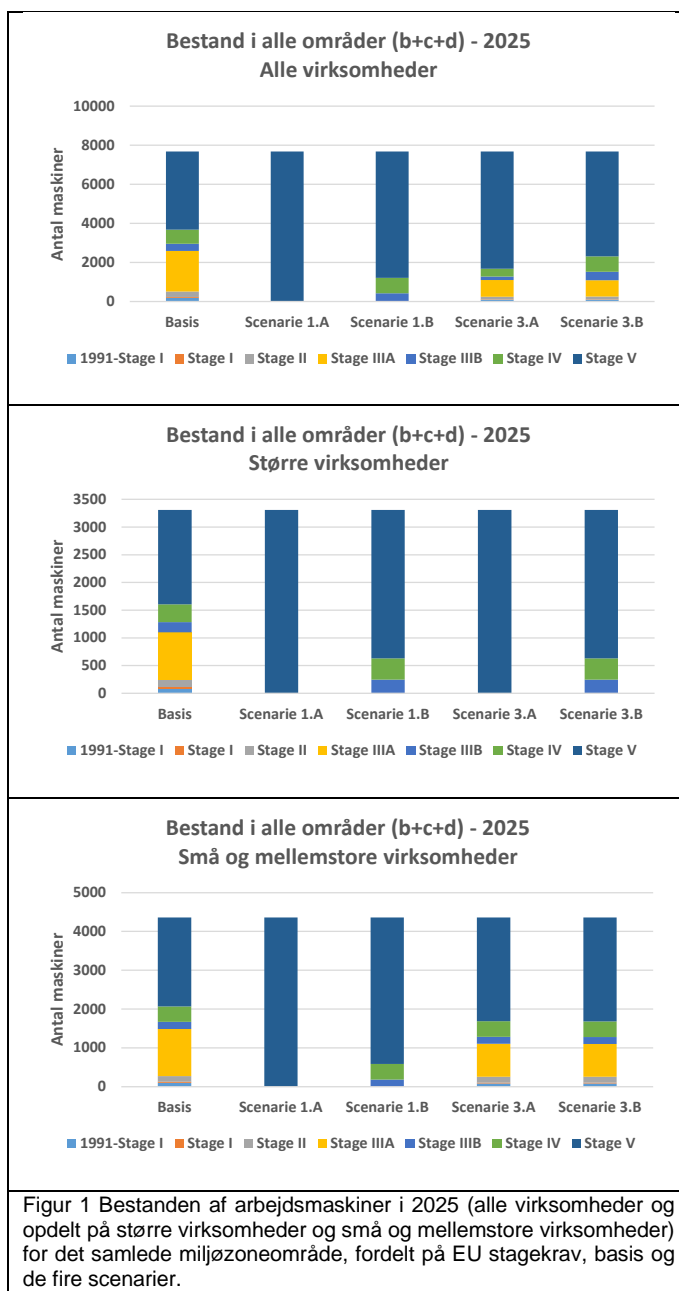
I scenarie 1.B er der relativt set lidt flere Stage IIIB og IV maskiner for større virksomheder end for små og mellemstore virksomheder inden for miljøzonerne. Årsagen er, som beskrevet i afsnit 1, at større virksomheder har mulighed for at substituere stage IIIA og ældre maskiner med Stage IIIB, IV eller V maskiner inden for virksomhedens maskinpark, mens små og mellemstore virksomheder er nødsaget til at købe en ny Stage V maskine.

I scenarie 3.A bruger større virksomheder kun Stage V maskiner inden for miljøzonerne, mens små og mellemstore virksomheder næsten altid vælger at betale en miljøafgift for at bruge deres eksisterende maskiner, og kun i få tilfælde køber en ny Stage V maskine, jf. beskrivelsen i afsnit 1.

I scenarie 3.B bruger større virksomheder kun Stage IIIB, IV og V maskiner inden for miljøzonerne, mens små og mellemstore virksomheder næsten altid vælger at betale en miljøafgift for at bruge deres eksisterende maskiner, og kun i få tilfælde køber en ny Stage V maskine.

## Emissionsfaktorer

De grundlæggende emissionsfaktorer for NO<sub>x</sub> og PM<sub>2,5</sub> kommer fra DEMOS-NRMM modellen (Winther, 2022) og er vist i Tabel 2. Faktorerne er opdelt i kW-størrelsesintervaller, EU emissionstrin og sammenhørende nysalgår, for motorer med hhv. variabel og konstant motorbelastning, og følger grupperingen i EU's



emissionslovgivning for mobile ikke-vejpgående maskiner. De rene emissionsgrænseværdier i henhold til EU's emissionsdirektiver (EU's stage krav) kan ses i Winther (2022).

Tabel 2 Emissionsfaktorer for NO<sub>x</sub> og PM<sub>2,5</sub> opdelt i kW-størrelsesintervaller, EU emissionstrin og sammenhørende nysalgsår, for motorer med hhv. variabel og konstant motorbelastning (motorbel.)

Størrelse	Effektklasse kW	EU emissionstrin	Variabel motorbel.		Konstant motorbel.		Emissionsfaktorer		
			Nysalgsår		Nysalgsår		NO <sub>x</sub>	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>2,5</sub> med DPF
			Fra	Til	Fra	Til	g/kWh	g/kWh	g/kWh
B	19<=P<37	1991-Stage I	1991	2000	1991	2006	9,8	1,4	
B	19<=P<37	Stage I							
B	19<=P<37	Stage II	2001	2006	2007	2010	6,5	0,4	
B	19<=P<37	Stage IIIA	2007	2018	2011	2018	6,075	0,4	
B	19<=P<37	Stage IIIB							
B	19<=P<37	Stage IV							
B	19<=P<37	Stage V	2019	9999	2019	9999	3,807	0,0035	0,0035
C	37<=P<56	1991-Stage I	1991	1998	1991	2006	11,5	0,8	
C	37<=P<56	Stage I	1999	2003			7,7	0,4	
C	37<=P<56	Stage II	2004	2007	2007	2011	5,5	0,2	
C	37<=P<56	Stage IIIA	2008	2012	2012	2018	3,807	0,2	
C	37<=P<56	Stage IIIB	2013	2018			3,807	0,019	0,0035
C	37<=P<56	Stage IV							
C	37<=P<56	Stage V	2019	9999	2019	9999	3,807	0,0035	0,0035
D	56<=P<75	1991-Stage I	1991	1998	1991	2006	11,5	0,8	
D	56<=P<75	Stage I	1999	2003			7,7	0,4	
D	56<=P<75	Stage II	2004	2007	2007	2011	5,5	0,2	
D	56<=P<75	Stage IIIA	2008	2011	2012	2014	3,807	0,2	
D	56<=P<75	Stage IIIB	2012	2014			2,97	0,017	0,004
D	56<=P<75	Stage IV	2015	2019	2015	2019	0,4	0,017	0,004
D	56<=P<75	Stage V	2020	9999	2020	9999	0,4	0,004	0,004
E	75<=P<130	1991-Stage I	1991	1998	1991	2006	13,3	0,4	
E	75<=P<130	Stage I	1999	2002			8,1	0,2	
E	75<=P<130	Stage II	2003	2006	2007	2010	5,2	0,2	
E	75<=P<130	Stage IIIA	2007	2011	2011	2014	3,24	0,2	
E	75<=P<130	Stage IIIB	2012	2014			2,97	0,017	0,004
E	75<=P<130	Stage IV	2015	2019	2015	2019	0,4	0,017	0,004
E	75<=P<130	Stage V	2020	9999	2020	9999	0,4	0,004	0,004
F	130<=P<560	1991-Stage I	1991	1998	1991	2006	11,2	0,4	
F	130<=P<560	Stage I	1999	2001			7,6	0,2	
F	130<=P<560	Stage II	2002	2005	2007	2010	5,2	0,1	
F	130<=P<560	Stage IIIA	2006	2010	2011	2013	3,24	0,1	
F	130<=P<560	Stage IIIB	2011	2013			1,8	0,017	0,004
F	130<=P<560	Stage IV	2014	2018	2014	2018	0,4	0,017	0,004
F	130<=P<560	Stage V	2019	9999	2019	9999	0,4	0,004	0,004

NO<sub>x</sub> og PM<sub>2.5</sub> emissionerne forøges gradvist som følge af motorslid henover motorens levetid. Forværrelsesfaktorerne regnes som den relative ændring af emissionerne over motorens maksimale levetid. Forværrelsesfaktorerne kommer fra DEMOS-NRMM (Winther, 2022) og er vist i Tabel 3 for de forskellige EU emissionstrin.

Tabel 3 Forværrelsesfaktorer pr. EU emissionstrin for non road dieselmotorer

EU emissionstrin	NO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>
Før Stage I	0,024	0,473
Stage I	0,024	0,473
Stage II	0,009	0,473
Stage IIIA, IIIB, IV, V	0,008	0,473

Justeringsfaktoren for varierende (transient) motorbelastning for en given maskintype afhænger af motorens emissionstrin og den gennemsnitlige motorbelastning. Transientfaktorerne kommer fra DEMOS-NRMM (Winther, 2022) og er vist i Tabel 4 for de forskellige EU emissionstrin og motorbelastningsintervaller.

Tabel 4 Transientfaktorer pr. EU emissionstrin og motorbelastningsinterval for non road dieselmotorer

EU emissionstrin	Motorbelastning	NO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>
Stage II og før	>0.45	0,95	1,23
Stage IIIA	>0.45	1,04	1,47
Stage IIIB-V	>0.45	1	1
Stage II og før	0.25≤LF≤0.45	1,025	1,6
Stage IIIA	0.25≤ LF≤0.45	1,125	1,92
Stage IIIB-V	0.25≤ LF≤0.45	1	1
Stage II og før	<0.25	1,1	1,97
Stage IIIA	<0.25	1,21	2,37
Stage IIIB-V	<0.25	1	1

En del af Stage IIIB og IV motorerne er udstyret med præinstalleret partikelfilter, som en strategi til at begrænse de forhøjede partikelemissioner der ses, når motordriften optimeres til at overholde emissionskravet for NO<sub>x</sub>. Andelen af Stage IIIB og IV motorer med præinstalleret partikelfilter (vist i Tabel 5) fordelt på kW effektklasser er bestemt af Winther (2022) ud fra spørgeskemaoplysninger fra de vigtigste non-road motorfabrikanter og -maskinimportører i Danmark.

Tabel 5 Andel af Stage IIIB og IV non-road dieselmotorer med præinstalleret partikelfilter

Effektklasse	Stage IIIB % DPF	Stage IV % DPF
19≤P<37	0	0
37≤P<56	30	80
56≤P<75	35	70
75≤P<130	90	70
130≤P<560	100	65
P>560	0	0

## Beregningsmetode

Emissionerne i et givet år, X, beregnes som produktet af antal maskiner, årlige driftstimer i miljøzonen (timer), motorstørrelse (kW), gennemsnitlig motorbelastning (%) og basisemissionsfaktor (g/kWh) på følgende måde:

$$E_{Basis}(X)_{i,j,k} = N_{i,j,k} \cdot HRS_{i,j,k} \cdot P \cdot LF_i \cdot EF_{y,z} \quad (1)$$

Hvor E<sub>Basis</sub> = basisemission, N = antal maskiner, HRS = årlige driftstimer i miljøzonen, P = motorstørrelse i kW, LF = gennemsnitlig motorbelastning, EF = emissionsfaktor i g/kWh, i = maskintype, j = motorstørrelse, k = motoralder, y = motorstørrelsesklasse og z = emissionstrin. Basisemissionsfaktorerne pr. motorstørrelsesklasse og emissionstrin er vist i Tabel 2.

Herefter sker en justering for forværrelse, transient motordrift og andel af maskiner med præinstalleret partikelfilter.

Forværrelsesfaktoren for dieselmaskiner afhænger af motorens størrelse, emissionstrin og motorens alder set i forhold til motorens maksimale levetid. Forværrelsesfaktoren beregnes med følgende udtryk:

$$DF_{i,j,k}(X) = \frac{K_{i,j,k}}{LT_i} \cdot DF_z \quad (2)$$

Hvor DF = forværrelsesfaktor, K = motorens alder, LT = motorens maksimale levetid, i = maskintype, j = motorstørrelse og z = emissionstrin.

Forværrelsesfaktorerne der indsættes i (2) er vist i Tabel 3.

Faktoren for transient motorbelastning for en given maskintype afhænger af motorens emissionstrin og den gennemsnitlige motorbelastning, og benævnes som:

$$TF_{i,j,k}(X) = TF_z \quad (3)$$

Hvor TF = transientfaktor, i = maskintype, j = motorstørrelse, k = motoralder, og z = emissionstrin. Faktorerne for transient motorbelastning der indsættes i (3) er vist i Tabel 4.

En del af Stage IIIB og IV motorerne er udstyret med partikelfilter fra start, som en strategi til at begrænse de forhøjede partikelemissioner der optræder, hvis motordriften optimeres til at overholde emissionskravet for NO<sub>x</sub>. Det er nødvendigt at tage hensyn til andelen af Stage IIIB og IV motorerne med præinstalleret partikelfilter i beregningerne, fordi Stage IIIB og IV basisemissionsfaktorerne for PM<sub>2.5</sub> svarer til de rene EU stagekrav, der ikke nødvendigvis kræver brug af partikelfilter for at blive overholdt.

Partikelreduktionsfaktoren, F<sub>dppf</sub>, for en given maskintype, motorstørrelse og motoralder afhænger af andelen af maskiner der er udstyret med partikelfilter som ny inden for de forskellige motorstørrelseskategorier for EU emissionstrinnene IIIB og IV:

$$F_{dppf,i,j,k}(X) = \frac{(1 - S_{y,z}) \cdot EF_{y,z} + S_{y,z} \cdot EF_{dppf,y,z}}{EF_{y,z}} \quad (4)$$

Hvor F<sub>dppf</sub> = partikelreduktionsfaktor, S = andelen af motorer med præinstalleret partikelfilter, i = maskintype, j = motorstørrelse, k = motoralder, y = motorstørrelsesklasse og z = emissionstrin. Andelen af motorer med præinstalleret partikelfilter der indsættes i (4) er vist i Tabel 5.

Beregningen af den endelige emission, E, for en given maskintype, motorstørrelse og motoralder beregnes som produktet af udtrykkene 1-4:

$$E(X)_{i,j,k} = E_{Basis}(X)_{i,j,k} \cdot TF(X)_{i,j,k} \cdot (1 + DF(X)_{i,j,k}) \cdot F_{dppf,i,j,k}(X) \quad (5)$$

I den endelige beregning er der også taget højde for at de samlede aktiviteter for de enkelte dieseldrevne maskintyper bevares for store virksomheder og små og mellemstore virksomheder i alle år, uanset hvilken miljøzone der betragtes og hvilke miljøkrav der gælder i det enkelte scenarie.

Det totale antal driftstimer pr. maskintype for store virksomheder og små og mellemstore virksomheder er fundet for basissituationen uden miljøzone indført, for hver af de fire miljøzoneafgrænsninger i året 2025. Disse totale antal driftstimer er holdt konstant i hver miljøzone i alle år, uanset hvilke miljøzonekrav der gælder i det enkelte scenarie.

### 3. Resultater

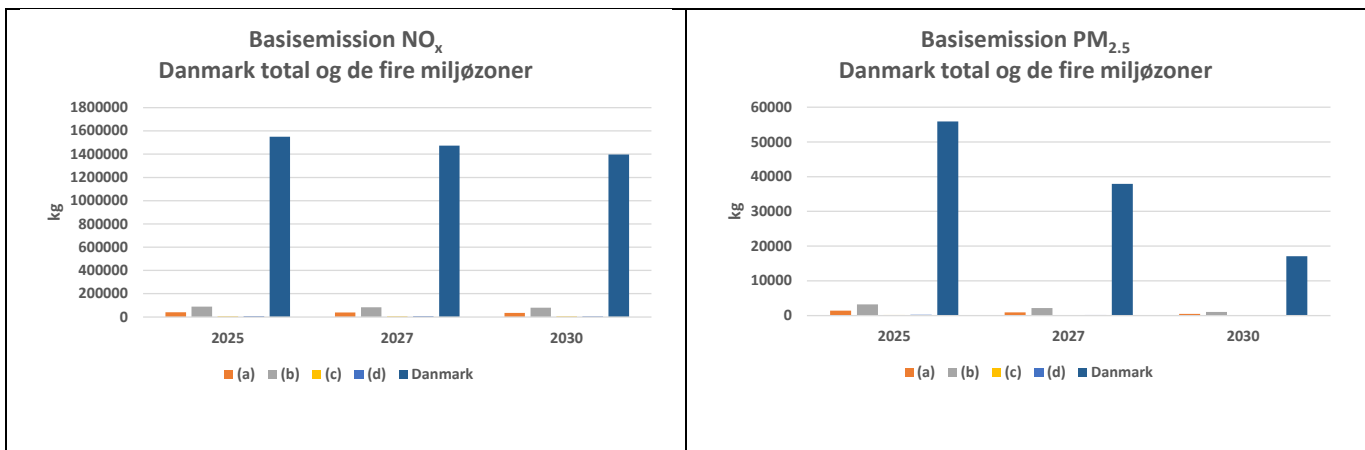
Tabel 6 viser NO<sub>x</sub> og PM<sub>2.5</sub> emissionstotalerne for miljøzonerne a-d og det samlede område b+c+d for basis (uden miljøzonekrav) og scenarierne 1.A, 1.B, 3.A og 3.B. Resultaterne er justeret for det geografiske overlap mellem zone b og c, og zone c og d.

Tabel 6 Resultater for miljøzonerne a-d og det samlede område b+c+d for basis (uden miljøzonekrav) og scenarierne 1.A, 1.B, 3.A og 3.B. Resultaterne er justeret for det geografiske overlap mellem zone b og c, og zone c og d													
Miljøzone	År	Maskiner	Timer x10 <sup>3</sup>	Basis		Scenarie 1.A		Scenarie 1.B		Scenarie 3.A		Scenarie 3.B	
				NO <sub>x</sub> kg	PM <sub>2.5</sub> kg	NO <sub>x</sub> kg	PM <sub>2.5</sub> kg	NO <sub>x</sub> kg	PM <sub>2.5</sub> kg	NO <sub>x</sub> kg	PM <sub>2.5</sub> kg	NO <sub>x</sub> kg	PM <sub>2.5</sub> kg
(a)	2025	Små/mellem	2300	236	10325	360	8905	27	9128	43	10093	323	10216
(a)	2025	Store	1329	668	29311	1022	25355	78	26124	130	25355	78	26124
(a)	2027	Små/mellem	2281	234	9752	245	8836	28	8967	37	9716	239	9716
(a)	2027	Store	1315	662	27705	696	25163	80	25604	110	25163	80	25604
(a)	2030	Små/mellem	2247	229	9214	119	8707	29	8773	32	9197	117	9197
(a)	2030	Store	1293	649	26200	337	24800	81	25009	91	24800	81	25009
(a)	2025	Samlet	3628	904	39636	1382	34260	106	35252	173	35447	401	36340
(a)	2027	Samlet	3596	896	37457	941	33999	108	34571	147	34879	319	35319
(a)	2030	Samlet	3540	877	35414	456	33507	110	33782	123	33997	198	34206
(b)	2025	Små/mellem	3266	536	23810	856	20470	63	20955	96	22707	450	22931
(b)	2025	Store	2930	1462	64926	2336	55825	172	57465	281	55825	172	57465
(b)	2027	Små/mellem	3245	532	22507	587	20329	64	20622	84	21896	430	21893
(b)	2027	Store	2900	1450	61375	1602	55440	176	56407	238	55440	176	56407
(b)	2030	Små/mellem	3199	521	21236	284	20049	66	20195	72	21181	268	21039
(b)	2030	Store	2854	1420	57912	774	54678	179	55137	199	54678	179	55137
(b)	2025	Samlet	6196	1998	88736	3192	76295	235	78420	378	78531	622	80395
(b)	2027	Samlet	6145	1981	83882	2189	75769	240	77029	323	77336	606	78300
(b)	2030	Samlet	6053	1941	79149	1058	74728	244	75332	271	75860	447	76176
(c)	2025	Små/mellem	491	26	1180	44	1011	3	1033	5	1173	43	1178
(c)	2025	Store	177	86	3876	143	3370	10	3451	16	3370	10	3451
(c)	2027	Små/mellem	487	26	1116	30	1005	3	1019	4	1114	29	1114
(c)	2027	Store	175	85	3678	97	3351	10	3401	14	3351	10	3401
(c)	2030	Små/mellem	480	25	1052	14	991	3	998	3	1051	14	1051
(c)	2030	Store	173	83	3480	45	3306	11	3330	12	3306	11	3330
(c)	2025	Samlet	668	112	5056	187	4381	13	4483	20	4543	53	4628
(c)	2027	Samlet	663	111	4794	127	4356	14	4420	18	4465	40	4515
(c)	2030	Samlet	653	109	4531	60	4298	14	4328	15	4357	25	4381
(d)	2025	Små/mellem	605	35	1564	57	1369	4	1394	6	1556	56	1561
(d)	2025	Store	202	99	4476	163	3926	12	4015	18	3926	12	4015
(d)	2027	Små/mellem	601	34	1485	39	1361	4	1377	5	1482	38	1482
(d)	2027	Store	201	98	4253	110	3905	12	3958	16	3905	12	3958
(d)	2030	Små/mellem	592	34	1407	18	1343	4	1351	5	1406	18	1406
(d)	2030	Store	198	97	4033	51	3853	12	3878	13	3853	12	3878
(d)	2025	Samlet	807	134	6040	221	5295	16	5409	24	5482	68	5576
(d)	2027	Samlet	801	133	5738	149	5266	16	5335	21	5388	50	5441
(d)	2030	Samlet	790	130	5440	68	5196	17	5229	18	5260	30	5284
b+c+d	2025	Samlet		2244	99832	3600	14380	85970	2244	14243	422	2244	88556
b+c+d	2027	Samlet		2225	94414	2465	14431	85391	2225	14289	361	2225	87188
b+c+d	2030	Samlet		2180	89120	1186	14360	84222	2180	14288	304	2180	85477

Figur 2 viser NO<sub>x</sub> og PM<sub>2.5</sub> basisemissionen i 2025, 2027 og 2030 for arbejdsmaskiner inden for brancherne bygge og anlæg, fremstillingsvirksomhed og handel og service for hele Danmark og for hver af de fire miljøzoneområder a-d.

Set i forhold til den samlede danske NO<sub>x</sub> og PM<sub>2.5</sub> basisemission for arbejdsmaskiner er basisemissionerne beregnet for de fire miljøzoneområder a-d ganske små. For det samlede geografiske område (b+c+d) udgør PM<sub>2.5</sub> basisemissionerne hhv. 6 %, 7 % og 7 % af den nationale basisemission i 2025, 2027 og 2030, og NO<sub>x</sub> basisemissionen udgør 6 % af den nationale basisemission i alle tre år.

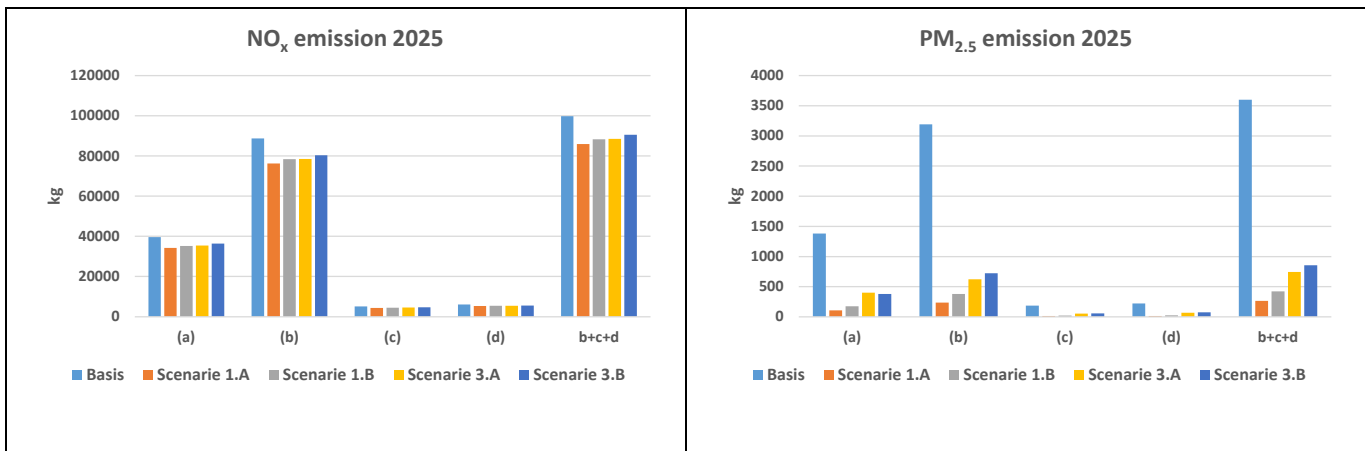




Figur 2 NO<sub>x</sub> og PM<sub>2.5</sub> basisemissionen i 2025, 2027 og 2030 for arbejdsmaskiner (total for brancherne bygge og anlæg, fremstillingsvirksomhed og handel og service) for hele Danmark og for hver af de fire miljøzoneområder a-d.

Figur 3 viser NO<sub>x</sub> og PM<sub>2.5</sub> emissionerne i 2025 for de fire miljøzoneområder a-d og det samlede område (b+c+d) både i basissituationen uden miljøzoner og for de fire scenarier.

NO<sub>x</sub> emissionerne for områderne a, b, c og d udgør 40 %, 89 %, 5 % og 6 % af de samlede NO<sub>x</sub> emissioner for det samlede område (b+c+d) både for basis og de fire scenarier i alle tre år (2027 og 2030 er ikke vist). Procentandelene for PM<sub>2.5</sub> emissionerne for områderne a-d er i samme størrelsesorden som for NO<sub>x</sub>. Der er dog lidt større variation i emissionsandelene fra år til år og mellem scenarier, fordi PM<sub>2.5</sub> emissionen er mere følsom end NO<sub>x</sub> over for forskellene i substitutions- og udskiftningsstrategier der antages i de forskellige scenarier, områder og år.



Figur 3 NO<sub>x</sub> og PM<sub>2.5</sub> emissionerne i 2025 for de fire miljøzoner a-d og det samlede område (b+c+d), basis og de fire scenarier.

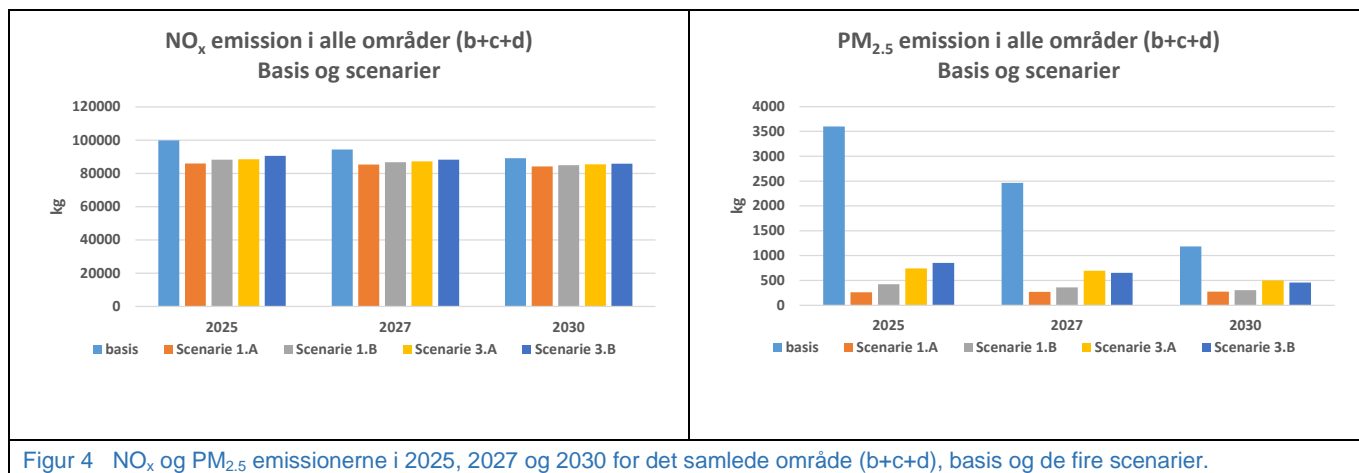
Figur 4 viser NO<sub>x</sub> og PM<sub>2.5</sub> emissionerne i 2025, 2027 og 2030 for det samlede område (b+c+d) både i basissituationen uden miljøzoner og for de fire scenarier. Disse emissioner kan også ses på Figur 1 for 2025, på hver delfigur yderst til højre.

De største NO<sub>x</sub> og PM<sub>2.5</sub> emissionsreduktioner opnås i Scenarie 1.A i 2025 hvor alle maskiner substitueres eller udskiftes til stage V maskiner (se også Figur 1). Emissionsreduktionerne er størst for PM<sub>2.5</sub>.

For PM<sub>2.5</sub> beregnes i 2025 en emissionsreduktion på 93 %, 88 %, 79 % og 76 % for hhv. Scenarie 1.A, 1.B, 3.A og 3.B, ift. til PM<sub>2.5</sub> basisemissionen i området. For NO<sub>x</sub> beregnes i 2025 en emissionsreduktion på 14 %, 12 %, 11 % og 9 % for hhv. scenarie 1.A, 1.B, 3.A og 3.B, ift. til basisemissionen i området.

Pga. den naturlige udskiftning til stage V maskiner i basisbestanden (Figur 1) falder især basisemissionerne af PM<sub>2.5</sub> markant frem mod 2030, og emissionseffekterne for PM<sub>2.5</sub> af at indføre miljøzoner bliver derfor også mindre og mindre frem mod 2030.

PM<sub>2.5</sub> basisemissionerne falder med 67 % fra 2025 til 2030. For scenarie 1.A stiger PM<sub>2.5</sub> emissionen med 4 %, og for scenarie 1.B, 3.A og 3.B falder PM<sub>2.5</sub> emissionerne med hhv. 28 %, 33 % og 46 % fra 2025 til 2030. I samme periode falder NO<sub>x</sub> basisemissionerne med 11 %, og for scenarie 1.A, 1.B, 3.A og 3.B falder NO<sub>x</sub> emissionerne med hhv. 2 %, 4 %, 3 % og 5 %.



Figur 4 NO<sub>x</sub> og PM<sub>2.5</sub> emissionerne i 2025, 2027 og 2030 for det samlede område (b+c+d), basis og de fire scenarier.

## 4. Konklusion og diskussion

NO<sub>x</sub> og PM<sub>2.5</sub> basisemissionerne beregnet for arbejdsmaskiner i det samlede geografiske område (b+c+d) er ganske små, og udgør mellem 6 % og 7 % af den nationale basisemission i alle årene 2025, 2027 og 2030.

De største NO<sub>x</sub> og PM<sub>2.5</sub> emissionsreduktioner opnås i Scenarie 1.A i 2025 hvor alle maskiner substitueres eller udskiftes til stage V maskiner. Emissionsreduktionerne er størst for PM<sub>2.5</sub>. For PM<sub>2.5</sub>[NO<sub>x</sub>] beregnes i 2025 en emissionsreduktion på 93 % [14 %], 88 % [12 %], 79 % [11 %] og 76 % [9 %] for hhv. Scenarie 1.A, 1.B, 3.A og 3.B, ift. til basisemissionen i det samlede område (b+c+d). Pga. den naturlige udskiftning til stage V maskiner i basisbestanden falder især basisemissionerne af PM<sub>2.5</sub> markant frem mod 2030 i det samlede område (b+c+d), og PM<sub>2.5</sub> emissionseffekterne af at indføre miljøzoner bliver derfor også mindre og mindre frem mod 2030. PM<sub>2.5</sub>[NO<sub>x</sub>] basisemissionerne falder med 67 % [11 %] fra 2025 til 2030. For scenarie 1.A stiger PM<sub>2.5</sub> emissionen med 4 %, mens NO<sub>x</sub> emissionen falder med 2 %. For scenarie 1.B, 3.A og 3.B falder PM<sub>2.5</sub>[NO<sub>x</sub>] emissionerne med hhv. 28 % [4 %], 33 % [3 %] og 46 % [5 %] fra 2025 til 2030.

Arbejdsmaskinernes påvirkning af luftkvaliteten i de foreslåede miljøzoner er undersøgt i projektet for scenarie 1.A og 3.A ved brug af den atmosfæriske lokalskala spredningsmodel OML-Multi. Både langtidspåvirkninger (koncentrationsbidrag til årlige gennemsnitsværdier) og korttidspåvirkninger (koncentrationsbidrag til spidsværdier) er undersøgt. De præcise positioner og tidspunkter for aktiviteterne med arbejdsmaskiner i miljøzonerne kendes ikke, og derfor bliver emissionerne jævnt fordelt som individuelle 200 m x 200 m arealkilder (og to arealkilder pr km<sup>2</sup>) i eksemplariske beregningsbyer, én beregningsby pr. geografisk område a-d. Beregningsbyerne er København og Frederiksberg i miljøzone (a), og en by af gennemsnitlig størrelse i miljøzonerne (b), (c) og (d). For at opnå realistiske årsmiddelværdier og spidsværdier, er der pålagt en tidsvariation på emissioner fra arbejdsmaskiner, så de kun emitterer i hverdagene mellem kl. 8 og kl. 15.

Koncentrationsbidragene fra arbejdsmaskiner til NO<sub>2</sub>- og PM<sub>2.5</sub>-koncentrationerne er højest i København og Frederiksberg. Dette skyldes, at NO<sub>x</sub>- og PM<sub>2.5</sub>-emissionerne per arealenhed er langt større for beregningsbyen København og Frederiksberg i miljøzone (a) end for beregningsbyerne i miljøzone (b), (c) og

(d). Koncentrationsbidragene fra arbejdsmaskiner til NO<sub>2</sub>- og PM<sub>2,5</sub>-koncentrationerne er sammenlignet med data fra år 2019, fordi Luften på din vej 2.0 kun indeholder data fra dette år, og fordi 2019 er et præ-corona år og derfor vil være mest repræsentativt.

Arbejdsmaskinernes emissionsbidrag til NO<sub>2</sub>- og PM<sub>2,5</sub>-bybaggrundskoncentrationerne udgør i basis hhv. 1,25 % og 0,05 % af de årlige målte bybaggrundskoncentrationer i København (Ellermann et al., 2020). Ved indførelse af miljøzonekrav vil de lavere emissioner fra arbejdsmaskiner nedbringe den årlige NO<sub>2</sub>-bybaggrundskoncentration med 0,2 % i både scenarie 1.A og 3.A, og reducere de årlige bybaggrundskoncentrationer for PM<sub>2,5</sub> med hhv. 0,04 % og 0,03 % i scenarie 1.A og 3.A.

Emissionerne fra arbejdsmaskiner har en større indflydelse på spidsværdierne for NO<sub>2</sub>- og PM<sub>2,5</sub>-koncentrationerne end på koncentrationernes årsgennemsnit. Emissionsbidraget fra arbejdsmaskiner til spidsværdien for NO<sub>2</sub>-koncentrationen (19. største timemiddelværdi) i København og Frederiksberg i 2025 udgør i basis 13,2 % af den højeste målte timemiddelværdi i bybaggrundskoncentrationen. De lavere bidrag fra arbejdsmaskiner til spidsværdien af NO<sub>2</sub>-koncentrationen ved indførelse af miljøzonekrav, vil give reduktioner på 1,8 % og 1,4 % af den højeste målte timemiddelværdi i bybaggrundskoncentrationen i København for hhv. scenarie 1.A og 3.A.

For PM<sub>2,5</sub> koncentrationerne findes ikke grænseværdier af spidsværdier, og de indgår derfor ikke i de officielle danske årlige opgørelser for luftkvaliteten. Arbejdsmaskinernes koncentrationsbidrag til bybaggrundskoncentrationen kan i stedet for sættes i forhold til den 4. største døgnmiddelværdi i bybaggrundskoncentrationen i København, der er målt til er 34,39 µg/m<sup>3</sup> (Ellermann et al., 2020), og emissionsbidraget fra arbejdsmaskiner udgør i basis 0,2 % af denne værdi. De lavere bidrag fra arbejdsmaskiner til den 4. største døgnmiddelværdi for PM<sub>2,5</sub>-koncentrationen ved indførelse af miljøzonekrav, vil give reduktioner på 0,18 % og 0,14 % af den 4. største døgnmiddelværdi for PM<sub>2,5</sub>-koncentrationen i København for hhv. scenarie 1.A og 3.A.

## Referencer

Cowi, 2023: Miljøzoner for arbejdsmaskiner, 52 s. Rapport udarbejdet af Cowi for Miljøministeriet. [Ny rapport om miljøzoner for arbejdsmaskiner \(cowi.dk\)](#).

Ellermann, T., Nordstrøm, C., Brandt, B., Christensen, J., Ketznel, M., Massling, A., Bossi, R., Frohn, L.M., Geels, C., Jensen, S.S., Nielsen, O.-K., Winther, M., Poulsen, M.B., Nygaard J., Nøjgaard, J.K. 2020. Luftkvalitet 2019. Status for den nationale luftkvalitetsovervågning. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 128 s. - Videnskabelig rapport nr. 410 <http://dce2.au.dk/pub/SR410.pdf>.

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

Lansø, A.S., Winther, M. & Plejdrup M., 2023. Miljøeffekter af miljøzoner for ikkevejgående arbejdsmaskiner. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 59 s. - Videnskabelig rapport nr. 564. [SR564.pdf \(au.dk\)](#).

Miljøministeriet 2021: [Ny aftale betyder grønnere og renere byer \(mim.dk\)](#).

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

Winther, M. 2022: Danish emission inventories for road transport and other mobile sources. Inventories until 2020. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 138pp. Scientific Report No. 504. <http://dce2.au.dk/pub/SR504.pdf>.