



Miljø- og  
Fødevareministeriet  
Miljøstyrelsen

# Røgrensning til mindre entreprenørmaskiner

August 2020

MUDP rapport

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Thomas Nørregaard Jensen, Teknologisk Institut

Stig Koust Hansen, Teknologisk Institut

Troels Dyhr Pedersen, Teknologisk Institut

Morten Køcks, Teknologisk Institut

Mende Trajkovski, Purefi A/S

Jes Steen Paulsen, Per Aarsleff A/S

Fotos:

Teknologisk Institut

ISBN: 978-87-7038-225-0

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse

# Indhold

<b>1.</b>	<b>Forord</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Ordforklaring</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>Sammenfatning og konklusion</b>	<b>6</b>
<b>4.</b>	<b>Summary and conclusion</b>	<b>9</b>
<b>5.</b>	<b>Introduktion</b>	<b>12</b>
5.1	Emissioner fra ikke-vejpgående maskiner og deres regulering	12
5.2	Projektets formål	14
5.3	Projektets udførelse	14
<b>6.</b>	<b>Udvikling af systemer til røgrensning</b>	<b>15</b>
6.1	Efterbehandlingssystemer til entreprenørmaskiner og overvejelser	15
6.2	Udvælgelse af relevant maskine i projektet	15
6.3	Beskrivelse af efterbehandlingssystemets komponenter	16
6.3.1	Trin 1: DOC	17
6.3.2	Trin 2: DPF	17
6.3.3	Trin 3: SCR	17
6.3.4	Trin 4: ASC	18
6.4	Udvikling af tre forskellige filtersystemer og integration på maskinen	18
6.4.1	System 1: DOC og DPF	19
6.4.2	System 2: DOC og DPF med SCR-coating	19
6.4.3	System 3: DOC, DPF og SCR	20
<b>7.</b>	<b>Systemernes virkningsgrad og målinger i nærmiljøet</b>	<b>21</b>
7.1	Overblik over målinger i projektet	21
7.1.1	Udstyr til direkte emissionsmåling	21
7.1.2	Udstyr til målinger i omgivelserne	22
7.2	Direkte emissioner: virkningsgrad for de tre systemer	22
7.3	Vægtede emissioner af partikler og NO <sub>x</sub> samt sammenligning med Stage V-krav	23
7.4	Målinger i nærmiljøet	25
7.5	Langtidsmonitorering i førerkabine	26
7.6	Samlet overblik over evalueringsparametre	27
7.7	Potentiale for udbredelse	28

# 1. Forord

Nærværende rapport er afslutningsrapporten for projektet "Røgrenningssystemer til mindre entreprenørmaskiner" under Miljøstyrelsens tilskudsordning Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP). Projektet er gennemført i perioden fra januar 2018 til december 2019 med det overordnede formål at udvikle, implementere og evaluere tre forskellige kosteffektive røgrenningssystemer til eftermontering på mindre entreprenørmaskiner. Disse systemer kaldes også for efterbehandlingsystemer.

Projektet er gennemført i et samarbejde mellem Per Aarsleff A/S, Purefi A/S og Teknologisk Institut. Rapporten giver et samlet overblik over det arbejde, der er udført i løbet af projektet, og over de væsentligste udfordringer, resultater og konklusioner.

Teknologisk Institut

Aarhus, januar 2020

## 2. Ordforklaring

Nedenfor er vist en oversigt over forkortelser, som anvendes i denne rapport

<b>Forkortelse</b>	<b>Engelsk betegnelse</b>	<b>Dansk betegnelse</b>
CPC	Condensation Particle Counter	-
DOC	Diesel Oxidation Catalyst	Dieseloxidationskatalysator
DPF	Diesel Particulate Filter	Dieselpartikelfilter
HC	Hydrocarbon	Hydrocarbon
NH <sub>3</sub>	Ammonia	Ammoniak
NO	Nitrogen oxide	Kvælstofoxid
NO <sub>2</sub>	Nitrogen dioxide	Kvælstofdioxid
NO <sub>x</sub>	Nitrous gases (sum of NO and NO <sub>2</sub> )	Nitrøse gasser (NO+NO <sub>2</sub> )
PM	Particulate Matter	Partikulært materiale
PM2.5	Fine particulate matter	Fine partikler (partikelmasse)
PMP	Particle Measurement Program	-
PSD	Particle Size Distribution	Partikelstørrelsesfordeling
PN	Particle Number	Partikelantal
SCR	Selective Catalytic Reduction	Selektiv katalytisk reduktion
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer	-

### 3. Sammenfatning og konklusion

I 2019 er indført skærpede EU-emissionskrav til nye, mindre entreprenørmaskiner, som også vil afføde strengere krav fra bygherrer og myndigheder til det eksisterende materiel, både nationalt og internationalt. Herunder ikke mindst skærpede krav til udledning af partikler, som i praksis medfører krav om partikelfilter for dette maskinsegment.

Med henblik på at kunne imødekomme de nye krav for eksisterende materiel, har Purefi og Teknologisk Institut således i samarbejde med Per Aarsleff udviklet, implementeret og evalueret tre forskellige efterbehandlingssystemer til eksisterende, mindre entreprenørmaskiner. Der har undervejs i projektet været fokus på udviklingen af simple og kosteffektive systemer. Implementeringen af efterbehandlingssystemerne skal samtidig sikre en bedre luftkvalitet på arbejdspladserne til gavn for de arbejdere og beboere i nærområdet, der berøres ved entreprenørarbejde.

Alle tre systemer indeholder en dieseloxydationskatalysator (DOC), som effektivt oxiderer CO og uforbrændte kulbrinter til CO<sub>2</sub> og vand. Det mest simple system i projektet, System 1, består udover en DOC af et dieselpartikelfilter (DPF), System 2 består af en DPF, som er blevet coated med SCR-materiale (selektiv katalytisk reduktion), og endelig består System 3 af en kombinationsløsning af en DPF og en dedikeret SCR-katalysator.

De udviklede systemer er alle blevet monteret og testet på en mindre gravemaskine med en motoreffekt på 35,5 kW. Maskinen er dermed placeret i segmentet fra 19-56 kW, som er omfattet af ændringerne i Stage V. Helt konkret er der valgt en Takeuchi TB260 gravemaskine, da denne opfylder de opstillede krav om blandt andet forventet levetid, pladsforhold, røggas-temperatur og maskinantal.

Alle tre systemer medfører en meget effektiv reduktion af partikler på over 99,7 %. For System 2 og System 3, som indeholder SCR-teknologi, er der målt gennemsnitlige NO<sub>x</sub>-reduktioner på henholdsvis 40-50 % og 95-97 %. Projektets hovedresultater og væsentligste obspunkter for en maskinejer i forbindelse med eftermontering af røgrensningsudstyr er opsummeret i nedenstående tabel.

Alle tre systemer medfører, at maskinens partikeludledning reduceres til et niveau, der er sammenligneligt med, hvad en Stage V-maskine over 19 kW må udlede. På NO<sub>x</sub>-siden medfører System 2, at NO<sub>x</sub>-udledningen reduceres til, hvad en Stage V-maskine på 19-56 kW må udlede, og for System 3 svarer NO<sub>x</sub>-udledningen til, hvad en Stage V-maskine på 56-560 kW må udlede.<sup>1</sup>

Med et af de tre systemer monteret på maskinen måles i nærmiljøet omkring maskinen ingen signifikant forskel i partikelniveau i forhold til baggrundsniveau, på trods af at der arbejdes med maskinen. Til sammenligning blev partikelniveauet i luften omtrent fordoblet i forhold til baggrundsniveauet omkring en tilsvarende maskine uden efterbehandlingssystem monteret. Denne forskel underbygges af langtidsmonitorering over cirka 8 uger af partikelmassekoncentrationen (PM<sub>2.5</sub>) i gravemaskinens førerkabine, som viser, at førerens eksponering overfor

---

<sup>1</sup> Baseret på en række antagelser, som er nærmere beskrevet i afsnit 7.3.

PM2.5 reduceres med ca. 50 %, når et efterbehandlingssystem er monteret på maskinen<sup>2</sup>. Ved interviews med brugerne af maskinen peges der da også på, at luften omkring maskinen opleves meget bedre og med færre lugtgener.

Det vurderes, at potentialet for udbredelse af efterbehandlingssystemerne afhænger meget af, hvilke krav der stilles fra myndigheder/bygherrer, idet projektets parter ikke forventer, at der i nævneværdig grad vil blive monteret efterbehandlingsudstyr på maskiner, hvor det ikke er påkrævet. Udover krav fra bygherrer/myndigheder kræves ikke mindst også, at samme myndighed eller bygherre efterfølgende udfører kontrol med, at de anvendte maskiner overholder de krav, som er blevet stillet.

Det vurderes desuden, at efterbehandlingssystemerne især vil være attraktive at montere på specialmaskiner, som har en markant længere driftsperiode end mere almindelige maskiner, hvor alternativet til efterbehandling er udskiftning til nye maskiner, som fra producentens side er udstyret med effektiv røgrænsning.

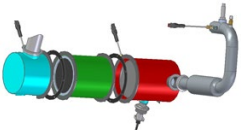
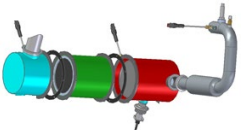
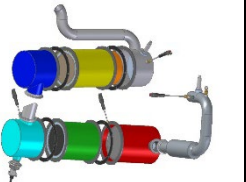
En væsentlig pointe er desuden, at hvis en maskinejer monterer efterbehandlingsudstyr på en maskine, er det afgørende, at kravene til dokumentation er klare, så maskinejeren kan fremskaffe den nødvendige dokumentation overfor bygherre/myndighed. Der er fx markant forskel på om effektiviteten af et efterbehandlingssystem skal dokumenteres med en omfattende måling med motoren i en testbænk, eller om det er tilstrækkeligt at foretage en emissionsmåling i felten med mere simpelt måleudstyr, hvor der fx måles partikelkoncentration (antal partikler/cm<sup>3</sup>) i stedet for antal partikler/kWh. I Schweiz har myndighederne i flere år således arbejdet med en "*comparison value*" på 250.000 partikler/cm<sup>3</sup>, som er grænseværdien for partikelantal, som skal overholdes af alle maskiner større end 18 kW<sup>3</sup>.

Det er oplagt at opstille lignende krav til maskiner med eftermonterede systemer i Danmark, som omfatter grænseværdier for både partikelantal (PN) og NO<sub>x</sub>. Grænseværdierne kunne baseres på en undersøgelse af de faktiske emissioner fra godkendte maskiner bestemt med simple feltmålinger og simpelt udstyr, som kan betjenes af kontrollerende myndigheder med henblik på opfølgende kontroller.

---

<sup>2</sup> Baseret på en række antagelser, som er beskrevet i afsnit 7.4.

<sup>3</sup> Ordinance on Air Pollution Control (OAPC) i Schweiz: <https://www.admin.ch/opc/en/classified-compilation/19850321/index.html>

	System 1 DPF	System 2 DPF med SCR-coating	System 3 DPF + SCR
			
Udviklet til	Takeuchi TB260 (35,5 kW)		
Virkningsgrad, partikler - tomgang til fuld belastning	> 99,7 %	> 99,7 %	> 99,7 %
Virkningsgrad, NO <sub>x</sub> - tomgang - 50-100 % belastning	- -	5-10 % 40-50 %	20-30 % 95-97 %
Miljøforbedring omkring maskinen (nærmiljøet)	I nærmiljøet måles ingen signifikant forskel i partikelniveau i luften hvad enten motoren er tændt eller ej. Der er ikke målt NO <sub>x</sub> i nærmiljøet.		
Tid før systemet er effektivt	Ingen	Partikelreduktion: Effektiv ved motorstart NO <sub>x</sub> -reduktion: Omkring 5-10 minutter.	
Pris <sup>4</sup>	35.000-40.000 kr.	55.000-60.000 kr.	70.000-75.000 kr.
Vedligeholdelse	Årlige serviceudgifter er 2.000-3.000 kr.	AdBlue-tanken skal genopfyldes ved ca. 500 liter dieselforbrug. AdBlue-forbrug er ca. 5 % af dieselforbruget. Årlige serviceudgifter er 3.000-5.000 kr.	
Levetid	5+ år	5+ år	5+ år
Tilsvarende Stage-krav for PN-emission (estimeret)	Stage V	Stage V	Stage V
Tilsvarende Stage-niveau for NO <sub>x</sub> -emission (estimeret) <sup>1</sup>	Stage IIIA	Stage V (19-56 kW)	Stage V (56-560 kW)

Evalueringsmatrix for de tre udviklede efterbehandlingssystemer i projektet, der bl.a. viser virkningsgraden over partikler og NO<sub>x</sub> ved forskellige belastninger.

<sup>4</sup> Priserne er baseret på et styktal på mindst 10-20 identiske systemer.



## 4. Summary and conclusion

In 2019, stricter EU emission requirements have been introduced for new, smaller construction machinery, which will also result in stricter requirements from builders and authorities for existing equipment, nationally as well as internationally. Especially stricter particulate emission requirements will be introduced, which in practice will result in requirement for particulate filter in this machine segment.

In order to meet the new requirements for existing equipment, Purefi and Danish Technological Institute have in collaboration with Per Aarsleff developed, implemented and evaluated three different aftertreatment systems for existing, smaller construction machinery. During the project, the focus has been on the development of simple and cost-effective systems. The implementation of the aftertreatment systems must at the same time ensure a better air quality in the workplaces for the benefit of the workers and residents in the immediate area affected by construction work.

All three systems contain a diesel oxidation catalyst (DOC) which effectively oxidizes CO and unburned hydrocarbons to CO<sub>2</sub> and water. Besides a DOC, the simplest system in the project, System 1, consists of a diesel particulate filter (DPF), System 2 consists of a DPF which has been coated with SCR material (selective catalytic reduction), and finally System 3 consists of a combination solution of a DPF and a dedicated SCR catalyst.

The developed systems have all been mounted and tested on a smaller excavator with an engine net power of 35.5 kW. The machine is thus placed in the segment from 19-56 kW, which is subject to changes in Stage V. More specifically, a Takeuchi TB260 excavator has been chosen, as it meets the requirements for i.a. life expectancy, space conditions, flue gas temperature and number of machines.

All three systems result in a very efficient reduction of particles above 99.7%. For Systems 2 and 3 containing SCR technology, average NO<sub>x</sub> reductions of 40-50% and 95-97% have been measured, respectively. The main results of the project and the most important points for a machine owner within: aftertreatment are summarized in the table below.

All three systems cause the particle emission of the machine to be reduced to a level comparable to the limit value of a Stage V machine over 19 kW. Focusing on the NO<sub>x</sub> emission, System 2 reduces the NO<sub>x</sub> emissions to a level comparable to the Stage V limit value for machines of 19-56 kW. For System 3, the NO<sub>x</sub> emission is comparable to the Stage V limit value of a machine of 56-560 kW.<sup>5</sup>

In the immediate vicinity of the machine with one of the three systems installed, no significant difference is measured in the particle concentration of the air, although the machine is running. In comparison, the particle level in the air was doubled relative to the background level around a similar machine with no aftertreatment system. This observation is supported by long-term monitoring over approximately 8 weeks of particle mass concentration (PM<sub>2.5</sub>) in the cabin of the excavator, which shows that the driver's exposure to PM<sub>2.5</sub> is reduced by approx. 50% when an aftertreatment system is installed on the machine.<sup>6</sup> Interviews with the users of the

---

<sup>5</sup> Based on a series of assumptions, which are described in section 7.3

<sup>6</sup> Based on a series of assumptions, which are described in section 7.4

machine indicate that the air around the machine feels much better and with fewer odour nuisances.

It is estimated that the potential for the application of the aftertreatment systems will depend very much on the requirements of the developer, as these are not expected to install aftertreatment equipment if it not required. It is further required that the same developer subsequently inspects that the applied machines comply with the requirements laid down.

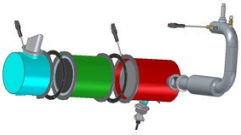
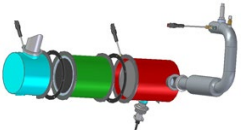
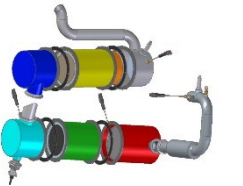
Furthermore, it is assessed that installation of aftertreatment systems will be particularly attractive to on special-purpose machines, which have a significantly longer operating period than ordinary machines, where the alternative to aftertreatment is replacement with new machines originally equipped with efficient smoke cleaning.

Another important point is that aftertreatment equipment is installed by the machine owner, it is essential that the requirements to the documentation are clear so that the necessary documentation can be submitted to the developer/authority. For instance, there is marked difference if you document the efficiency of a post-processing/after-treatment system with an extensive measurement with the engine in a test bench or if it is enough to carry out an emission measurement in the field using more simple measuring equipment, for instance, by measuring particulate concentration (number of particles/cm<sup>3</sup>) instead of number of particles/kWh. In Switzerland the authorities have for several years therefore worked with a "comparison value" of 250,000 particles/cm<sup>3</sup>, which is the limit value for particle numbers, and all machines above 18 kW must comply with this limit value.<sup>7</sup>

It is natural to lay down similar requirements in Denmark for machines with retrofitted systems, which include limit values for both particle number (PN) and NO<sub>x</sub>. The limit values could be based on an examination of the actual emissions from approved machines determined by simple field measurements and simple equipment, which can be operated by inspection authorities for follow-up checks.

---

<sup>7</sup> Ordinance on Air Pollution Control (OAPC) in Switzerland: <https://www.admin.ch/opc/en/classified-compilation/19850321/index.html>

	1) DPF	2) SCR-coated DPF	3) DPF + SCR
			
Developed for	Takeuchi TB260 (35.5 kW)		
Efficiency, particle emission - idle running to full load	> 99.7%	> 99.7%	> 99.7%
Efficiency, NO <sub>x</sub> - idle running - 50-100 % load	- -	5-10% 40-50%	20-30% 95-97%
Improvement of the immediate environment (near the machine)	No significant difference in particle level in the air in the immediate environment of the machine can be measured whether the machine is running or not. NO <sub>x</sub> has not been measured in the immediate environment.		
Warmup time of the system	None	Particle reduction: no warmup time NO <sub>x</sub> -reduction: appr. 5-10 minutes.	
Price <sup>8</sup>	35,000-40,000 DKK	55,000-60,000 DKK	70,000-75,000 DKK
Maintenance	Annual service cost is 2-3,000 DKK	The AdBlue tank should be refueled after appr. 500 litre diesel consumption, and AdBlue consumption is appr. 5% of the diesel consumption. Annual service cost is 3-5,000 DKK.	
Lifetime	5+ years	5+ years	5+ years
Corresponding Stage level for PN emission (estimated) <sup>Fejll</sup> <small>Bogmærke er ikke defineret.</small>	Stage V	Stage V	Stage V
Corresponding Stage level for NO <sub>x</sub> emission (estimated) <sup>Fejll</sup> <small>Bogmærke er ikke defineret.</small>	Stage IIIA	Stage V (19-56 kW)	Stage V (56-560 kW)

Evaluation matrix for the three developed aftertreatment systems, which among other things, shows the reduction efficiency of particles and NO<sub>x</sub> at different loads.

<sup>8</sup> The prices are based on a quantity of at least 10-20 identical systems.

# 5. Introduktion

## 5.1 Emissioner fra ikke-vejpgående maskiner og deres regulering

Skærpede emissionskrav til den vejpgående trafik har over de sidste par årtier medført en væsentlig forbedring i luftkvaliteten i Europa. Emissioner fra den ikke-vejpgående trafik har dog ikke undergået nær samme regulering og udgør således en stigende andel af den samlede luftforurening. Den ikke-vejpgående trafik har dermed også en væsentlig betydning i forhold til den generelle folkesundhed. I 2014 estimerede DCE, at der er 3.400 for tidlige dødsfald årligt som følge af luftforurening alene i Danmark<sup>9</sup>. EU har samtidig øget fokus på mobile ikke-vejpgående maskiner, da emissionsbidraget fra dette segment vurderes at udgøre op mod 20 % af den samlede udledning bl.a. på grund af strammere krav til udledning for de øvrige sektorer<sup>10</sup>.

Entrepreneurmaskiner benyttes ofte i tætbefolkede områder og skal i dag alene leve op til de såkaldte Stage-emissionskrav, som traditionelt har været mindre ambitiøse end kravene til vejpgående køretøjer (EURO-norm-kravene). Dette gælder i særlig grad for mindre entrepreneurmaskiner, der hidtil kun har været omfattet af væsentligt mildere emissionskrav og derfor kun i begrænset omfang har tiltrukket sig filterproducenternes opmærksomhed. Fra 2019 træder Euro Stage V-standarden imidlertid i kraft. Standarden gælder for nye entrepreneurmaskiner, og som noget helt nyt introduceres emissionskrav til netop mindre maskiner under 56 kW. Med Stage V indføres en grænseværdi for partikelantal (PN), og dermed i praksis et behov for partikelfiltre. Introduktionen af Stage V forventes samtidig at skærpe fokus på emissionskravet til ældre maskiner, pga. krav fra bl.a. bygherrer eller myndigheder om overholdelse af de nye emissionskrav på byggepladser eller i miljøzoner. Dette er ikke mindst set i udlandet, herunder Berlin og London.

Europæiske emissionsnormer for motorer, der anvendes for nye, mobile ikke-vejpgående maskiner (NRMM), er således blevet implementeret som gradvist strengere niveauer kendt som stage I- til stage V-standarden. Se FIGUR 1, der som et eksempel viser emissionskravene til HC + NO<sub>x</sub> og PM for maskiner med motorer mellem 130 kW og 560 kW for alle fem Stage-standarden.

---

<sup>9</sup> Luftforureningens indvirkning på sundheden i Danmark - Sammenfatning og status for nuværende viden. DCE, Aarhus Universitet. 2014

<sup>10</sup> Udredning for mobile ikke-vejpgående maskiner i Danmark, Miljøstyrelsen, marts 2019.  
<https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2019/02/978-87-7038-046-1.pdf>

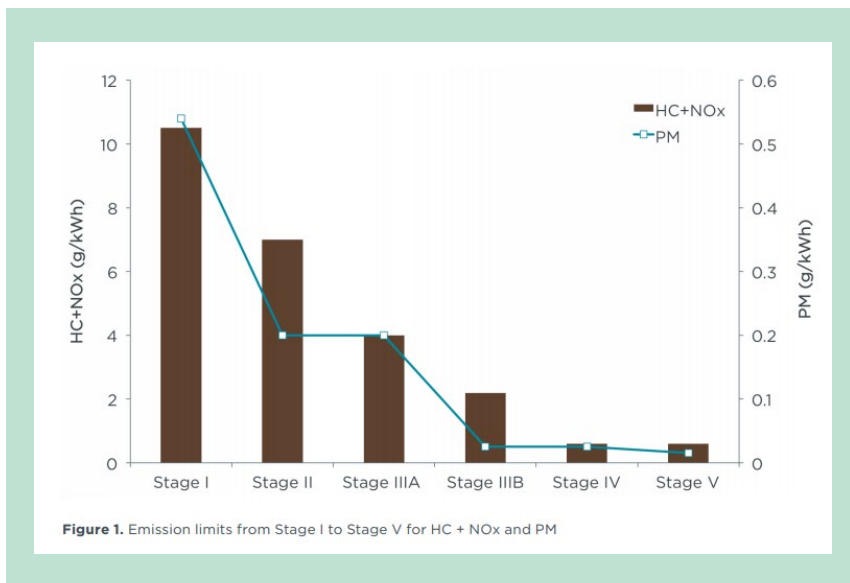


Figure 1. Emission limits from Stage I to Stage V for HC + NOx and PM

**FIGUR 1.** Udviklingen i emissionskrav fra stage I til stage V for hydrocarbon (HC) + NO<sub>x</sub> og PM for maskiner med motorer mellem 130 kW og 560 kW. Kilde: [www.theicct.org](http://www.theicct.org)<sup>11</sup>.

Stage V trådte i kraft 1. januar 2019 for motorer under 56 kW og over 130 kW (se oversigt over Stage V-emissionsstandarden i FIGUR 2). For motorer mellem 56 kW og 130 kW træder Stage V først i kraft fra 1. januar 2020. Som noget nyt er partikelantal (PN) inkluderet i Stage V, som gælder for nye maskiner mellem 19 og 560 kW. PN-grænsen skal sikre en meget effektiv partikelrensning og i praksis krav om partikelfilter.

Category	Jgn.	Net Power kW	Date	CO	g/kWh		PM	PN 1/kWh
					HC	NO <sub>x</sub>		
NRE-v/c-1	CI	P < 8	2019	8.00	7.50 <sup>a,c</sup>	0.40 <sup>b</sup>	-	
NRE-v/c-2	CI	8 ≤ P < 19	2019	6.60	7.50 <sup>a,c</sup>	0.40	-	
NRE-v/c-3	CI	19 ≤ P < 37	2019	5.00	4.70 <sup>a,c</sup>	0.015	1×10 <sup>12</sup>	
NRE-v/c-4	CI	37 ≤ P < 56	2019	5.00	4.70 <sup>a,c</sup>	0.015	1×10 <sup>12</sup>	
NRE-v/c-5	All	56 ≤ P < 130	2020	5.00	0.19 <sup>c</sup>	0.40	1×10 <sup>12</sup>	
NRE-v/c-6	All	130 ≤ P ≤ 560	2019	3.50	0.19 <sup>c</sup>	0.40	1×10 <sup>12</sup>	
NRE-v/c-7	All	P > 560	2019	3.50	0.19 <sup>d</sup>	3.50	0.045	

<sup>a</sup> HC+NO<sub>x</sub>  
<sup>b</sup> 0.60 for hand-startable, air-cooled direct injection engines  
<sup>c</sup> A = 1.10 for [gas engines](#)  
<sup>d</sup> A = 6.00 for [gas engines](#)

**FIGUR 2.** Oversigt over Stage V-emissionsstandarden for mobile ikke-vejpgående maskiner.

De største konsekvenser for Stage IV og V vurderes at være følgende:

- Krav for partikelantal i Stage V for maskiner mellem 19 og 560 kW gør partikelfiltre til en nødvendighed for disse maskiner
- Krav om NO<sub>x</sub>-reduktion for maskiner >56 kW i Stage IV (i forhold til Stage IIIA) gør SCR-katalysator til en nødvendighed for disse maskiner<sup>10</sup>.

<sup>11</sup> The ICCT: European Stage V non-road emission standards, policy update, November 2016.

[https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-Stage-V\\_policy%20update\\_ICCT\\_nov2016.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-Stage-V_policy%20update_ICCT_nov2016.pdf)

## 5.2 Projektets formål

Projektets overordnede formål har været at udvikle, integrere og evaluere tre forskellige kost-effektive efterbehandlingssystemer til mindre entreprenørmaskiner. Ambitionen er, at disse systemer vil kunne imødekomme generelt strengere krav fra bl.a. myndigheder og bygherrer til maskinernes partikel- og NO<sub>x</sub>-emissioner, men samtidig være tilpas attraktive fra et økonomisk perspektiv i forhold til alternativet, som er at udskifte de ældre maskiner til nyere modeller, som fra fabrikken er udstyret med partikelfilter og NO<sub>x</sub>-katalysator.

Purefi har været ansvarlig for udviklingen og implementeringen af efterbehandlingssystemerne og har i flere år arbejdet med at udvikle filterløsninger til den ikke-vejpgående sektor. Effekten af de udviklede systemer i projektet er løbende blevet dokumenteret af Teknologisk Institut, både on-site ved Per Aarsleff og på udvalgte lokationer, hvor den udvalgte gravemaskine ved Per Aarsleff har været i brug.

## 5.3 Projektets udførelse

Projektet løb fra januar 2018 til december 2019 og blev således gennemført indenfor den normerede tidsramme og uden væsentlige forhindringer undervejs.

I de følgende kapitler beskrives det udførte arbejde i projektet – fra udvikling og overvejelser omkring de enkelte systemer til dokumenterende målinger efter installation på den udvalgte gravemaskine.

# 6. Udvikling af systemer til røgrensning

## 6.1 Efterbehandlingssystemer til entreprenørmaskiner og overvejelser

Partikelfiltre til dieselmotorer produceres i dag hovedsageligt i porøse keramiske materialer såsom siliciumkarbid og cordierit. Samtidig findes kommercielt tilgængelige systemer til fjernelse af NO<sub>x</sub>, fx baseret på katalytisk reduktion (SCR). For entreprenørmaskiner er der dog nogle særlige krav, der gør sig gældende til fx regenerering (forbrænding af opsamlet sod), idet driftsprofilen typisk er mere varierende end for (vejgående) køretøjer. Særligt er udstødnings-temperaturen oftest lavere sammenlignet med fx lastbiler, hvilket, uden den rette tilpasning, i værste tilfælde kan lede til motorhavari som følge af for stort modtryk i filteret.

Den dominerende teknologi til NO<sub>x</sub>-reduktion er i dag selektiv katalytisk reduktion – SCR. Denne teknologi er baseret på, at NO<sub>x</sub> reagerer med ammoniak i en katalysator. Ammoniakken frigøres fra urea, som løbende tilsættes. Systemerne er forholdsvis dyre, eftersom der kræves separate katalysatorer, doseringssystemer og sensorer. Disse omkostninger kan retfærdiggøres på personbiler og større køretøjer, men omkostningerne kan være en hindring for implementering på især mindre entreprenørmaskiner.

Disse overvejelser har betydet, at der i projektet har været særligt fokus på løsninger, som kan sikre regenerering af filtrene, og på kosteffektive løsninger til håndtering af NO<sub>x</sub>-emissioner.

## 6.2 Udvalgelse af relevant maskine i projektet

I forbindelse med udvælgelsen af en relevant maskine har projektgruppen lagt vægt på tekniske, praktiske og økonomiske forhold, herunder det samlede maskinantal, restlevetid for den pågældende maskine, pladsforhold og driftsmønster.

Med de nye Stage V-krav stilles skærpede krav til maskiner med en motoreffekt på 19-56 kW, hvorfor der udvælges en maskine med en nettoydelse i dette interval. Det er desuden en fordel, at maskinens røggastemperatur er over ca. 200 °C, da SCR-katalysatoren ikke vil være effektiv ved lavere temperaturer. Maskinens driftsmønster er heller ikke uvæsentlig, da for meget tid i tomgang kan forårsage, at røggastemperaturen kommer under 200 °C.

Derudover skal der helst være plads nok til at eftermontere systemet under motorhjelm, da det vil være upraktisk at placere systemet andre steder. Maskinens værdi skal desuden være høj nok til at retfærdiggøre udgiften forbundet med at eftermontere et efterbehandlingssystem. Det skal være rentabelt for maskinejeren at eftermontere et system på en ældre maskine frem for at udskifte den til en ny maskine, der fra fabrikken er udstyret med partikelfilter og SCR-katalysator.

Maskinens restlevetid skal være over 4 år. Levetiden er anhangig af, hvor mange timer den enkelte maskine kører, men hos Per Aarsleff er levetiden normalt mellem 6 og 8 år.

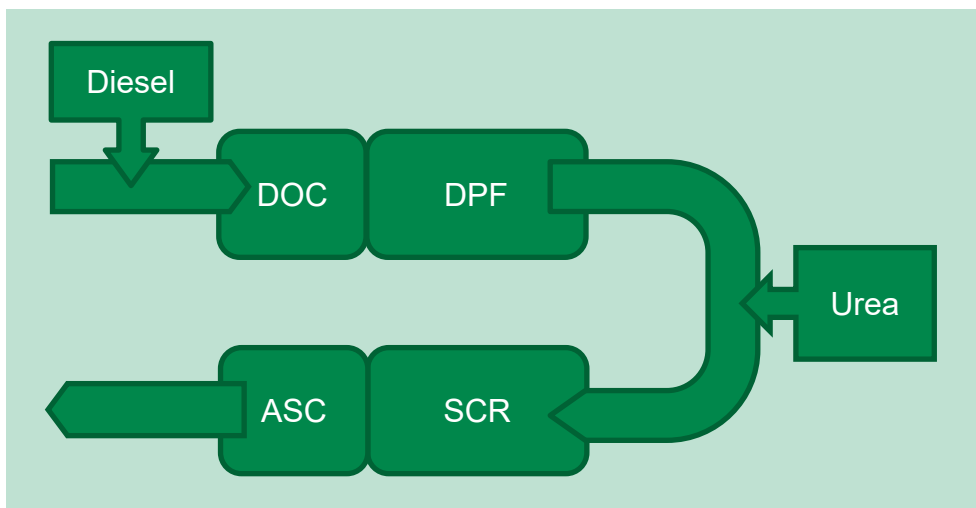
På baggrund af ovenstående udvælgelseskriterier er valget faldet på en Takeuchi TB260 gravemaskine med en 35,5 kW motor (se FIGUR 3).



**FIGUR 3.** Billede af den udvalgte gravemaskine - en Takeuchi TB260.

### 6.3 Beskrivelse af efterbehandlingssystemets komponenter

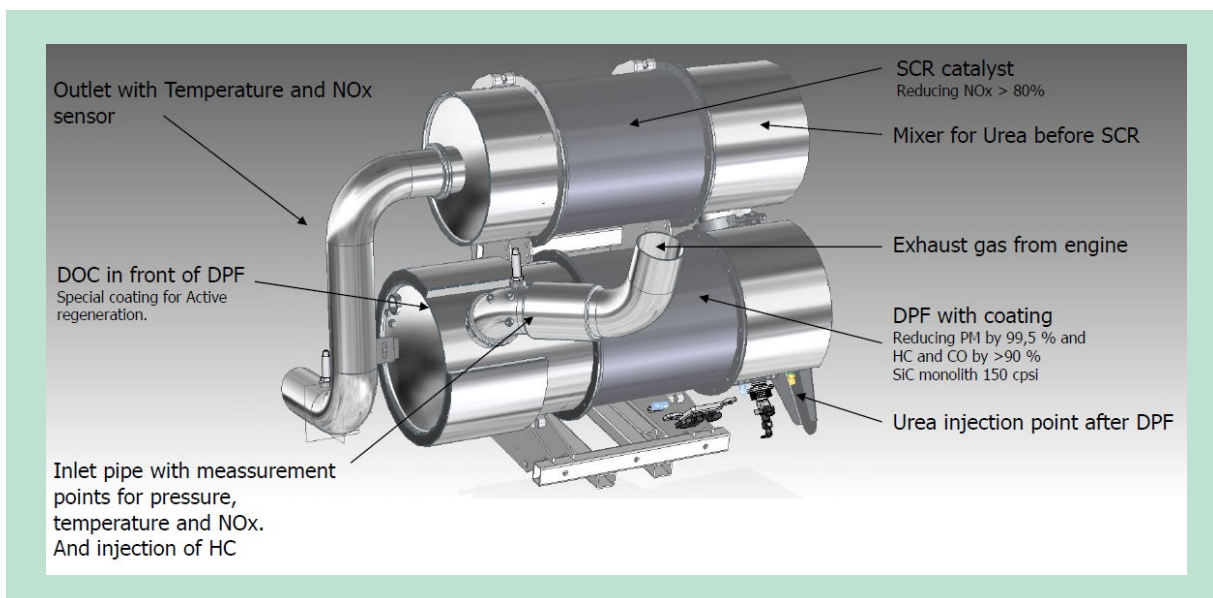
Efterbehandlingen af udstødningen fra dieselmotorer foretages i et system med op til fire komponenter, som hver har en specialiseret opgave. Den normale rækkefølge i opbygningen af et system med alle komponenter fremgår af FIGUR 4.



**FIGUR 4.** Skitse af typiske komponenter i et efterbehandlingsystem.

FIGUR 5 viser en computergenereret visualisering af, hvordan komponenterne i et efterbehandlingsystem kan være placeret i forhold til hinanden.





**FIGUR 5.** Visualisering af komponenterne i et typisk efterbehandlingssystem.

### 6.3.1 Trin 1: DOC

Første komponent i udstødningssystemet er en dieseloxydationskatalysator, forkortet DOC. I katalysatoren forbrændes CO og kulbrinter, som derved omdannes til CO<sub>2</sub> og vand. Katalysatoren oxiderer også en del af udstødningens NO til NO<sub>2</sub>, som er aktivt i oxidation af sod i partikelfilteret.

### 6.3.2 Trin 2: DPF

Efter DOC'en passerer udstødningsgassen gennem dieselpartikelfilteret (DPF). Filteret er konstrueret i et porøst, keramisk materiale og belagt med en katalytisk belægning. Det katalytiske materiale sænker den temperatur, som kræves for at afbrænde sodpartiklerne. Processen hvor sodpartiklerne brændes af, kaldes regenerering.

Ved lave temperaturer sker der overvejende en ophobning af sod, mens der ved højere temperaturer sker en løbende afbrænding af sod. Hvis motoren regelmæssigt eller overvejende arbejder ved høj belastning, og udstødningsgassen er over ca. 280 °C, kan den opsamlede sod afbrændes løbende uden assistance. Hvis temperaturen ikke er høj nok til at sikre løbende afbrænding, kan den hæves kunstigt ved at tilsætte diesel foran DOC'en, hvorved temperaturen hæves markant.

Afbrændingen af sodpartikler kan være yderligere assisteret af et additiv, som tilsættes dieselbrændstoffet med et doseringsanlæg. Additivet indeholder organisk bundet jern, som frigøres under forbrændingen. Jernatomerne indlejres i sodpartiklerne, hvor de fungerer som katalysatorer. Således forbrændes sodpartiklerne ikke kun på overfladen af partikelfilteret, men også i de aflejrede lag af sod. Dette giver en mere effektiv regenerering af filteret ved lave temperaturer.

### 6.3.3 Trin 3: SCR

Efter partikelfilteret tilføres udstødningsgassen en vandig opløsning af urea ved forstøvning gennem en doseringsdyse, som styres elektronisk. Gassen ledes herefter gennem en sektion, hvor der sker opblanding og fordampning af den indsprøjtede urea. En mindre del af den tilførte urea vil undervejs blive omdannet til ren ammoniak, mens størstedelen føres med gas- sen uden at reagere.

Når udstødningsgassen ledes gennem SCR-katalysatoren afsættes urea på indersiden af katalysatoren, hvor den høje temperatur sikrer en hurtig omdannelse til ammoniak. Ammoniakken bindes på overfladen af katalysatoren, hvor den reagerer med NO og NO<sub>2</sub>. Processen danner primært vand og fri nitrogen (N<sub>2</sub>).

Omdannelsen af NO og NO<sub>2</sub> til nitrogen er den mest komplicerede del af efterbehandlingssystemet, da der foregår mange parallelle kemiske processer, som hver omdanner NO og NO<sub>2</sub> eller begge. Den samlede virkningsgrad er primært afhængig af temperaturen, sammensætningen af katalysatoren og koncentrationen af reaktanterne – herunder hvor meget ammoniakken der findes adsorberes på overfladen af katalysatoren. Hvis disse parametre er afstemt fornuftigt, kan der ofte opnås over 80 % reduktion af NO<sub>x</sub>, ved udstødningstemperaturer over 250 °C.

For at sikre en høj omsætning af NO<sub>x</sub> skal doseringen af urea ske i det rigtige forhold med NO og NO<sub>2</sub>. Overordnet set reagerer NO og NO<sub>2</sub> med ammoniak i forholdet 1:1 på molbasis, og det tilstræbes derfor at ramme dette forhold under doseringen. Doseringen bestemmes af en algoritme på baggrund af information om temperaturen og NO<sub>x</sub>-niveauet, som måles før DOC'en. Massestrømmen af udstødningsgas kan estimeres ud fra trykfaldet gennem katalysatoren. En ekstra NO<sub>x</sub>-sensor efter SCR-katalysatoren kan anvendes til mindre korrektioner af den indsprøjtede mængde urea.

Ved anvendelse af urea vil doseringssystemet først blive aktiveret, når katalysatoren er opvarmet til over ca. 200 °C. Dette skyldes en begrænsning i fordampningen og den kemiske omdannelse af urea til ammoniak. Doseringssystemet vil ligeledes blive deaktiveret hvis temperaturen falder til under 200 °C, hvilket vil ske, hvis motoren står længere tid med meget lav belastning eller i tomgang.

#### **6.3.4 Trin 4: ASC**

Ammoniakslipkatalysatoren (ASC'en) er en katalysator, som har til formål at omdanne overskydende ammoniak, som undslipper fra SCR-katalysatoren. Dette er især nødvendigt, når temperaturen i SCR-katalysatoren stiger over kort tid, da dette frigiver en del af den bundne ammoniak, som derved undslipper katalysatoren uden at reagere med NO<sub>x</sub>.

De primære produkter i omdannelsen af ammoniak i ASC er nitrogen og vand, men der kan også dannes mindre mængder af NO<sub>x</sub> og N<sub>2</sub>O (lattergas) under visse forhold.

Slipkatalysatoren sikrer også, at den NO<sub>x</sub>-sensor, som sidder efter SCR-katalysatoren, ikke påvirkes af ammoniak, hvilket betyder, at doseringsalgoritmen får et mere præcist billede af effektiviteten.

### **6.4 Udvikling af tre forskellige filtersystemer og integration på maskinen**

For Per Aarsleff har et fokuspunkt været, at systemet skal være effektivt i forhold til prisen. En sådan kosteffektiv løsning kan gøre det mere attraktivt at eftermontere partikelfilter og katalysator på ældre Stage IIIA-maskiner i stedet for at købe nye Stage V-maskiner.

Purefi har som målsætning at udvikle et efterbehandlingssystem, der er så kosteffektivt som muligt. Indledningsvis udvikles en nedskaleret version af et system, som Purefi i dag ville installere på en bus eller lastbil. Systemet vil være modulopbygget og vil i udgangspunktet være en kombinationsløsning bestående af et partikelfilter og en SCR-katalysator. Til at starte med vil det være et forholdsvis avanceret system indeholdende et større antal sensorer for at sikre, at systemet yder optimalt. I løbet af udviklingsfasen vil systemet gradvist blive gjort mere "simpelt", idet forskellige sensorer og moduler enten kobles fra eller udskiftes med mere simple

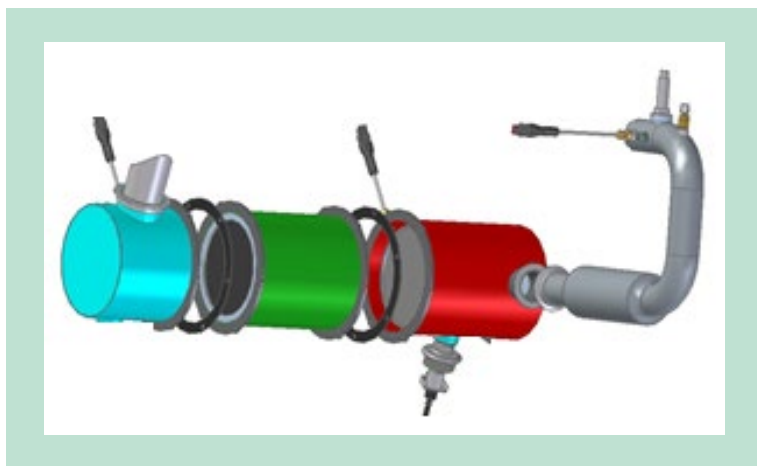
versioner. Systemets effektivitet overfor partikler og gasser måles undervejs som et led i at bestemme den mest kosteffektive konfiguration af systemet.

Ved udviklingen af de tre løsninger til projektet har der været fokus på:

- Udvikling af DPF og SCR til mindre dieselmotorer
- Kompakt design pga. meget begrænset plads i motorrummet
- Brugsmønster for maskinen (væsentlig forskelligt fra fx lastbiler og busser)
- Vibrationer
- Stort spænd i udstødningstemperatur (lange perioder med tomgang og korte perioder med meget høj motorbelastning)
- Aktiv regenerering for at undgå filtertilstopning
- Aktiv SCR-katalysator ved både lave og meget høje udstødningstemperaturer.

#### 6.4.1 System 1: DOC og DPF

System 1 er det mest simple og består af et dieselpartikelfilter (DPF) med tilhørende dieseloxydationskatalysator (DOC). Dette system er meget effektivt til at fjerne partikler fra røggassen og til at omdanne CO og HC til CO<sub>2</sub> og vand, men medfører ingen reduktion i NO<sub>x</sub>. Systemet har desuden en række sensorer monteret for at overvåge driftsforhold for motoren og systemet (fx temperatur og modtryk). Opbygningen af System 1 er skitseret i FIGUR 6.



FIGUR 6. Skitse over opbygning af System 1 (DOC og DPF).

#### 6.4.2 System 2: DOC og DPF med SCR-coating

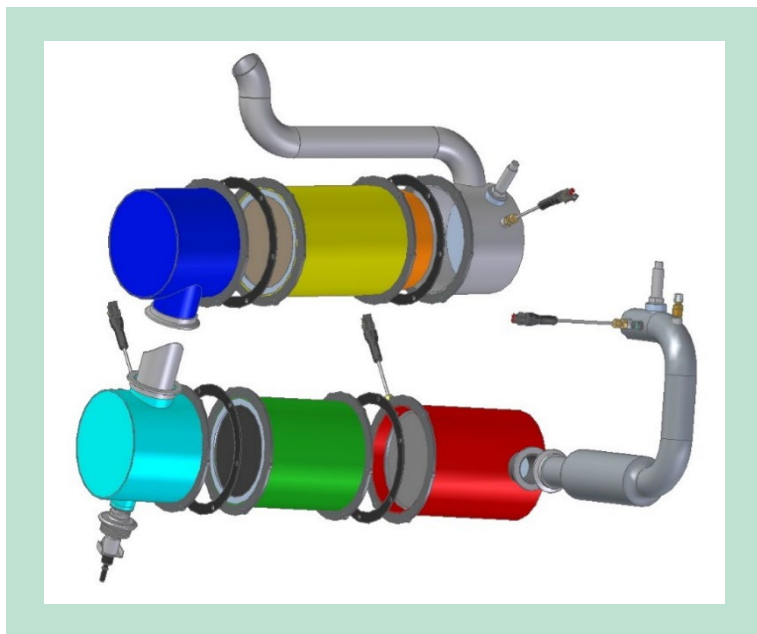
System 2 system ligner System 1, men med den væsentlige forskel, at DPF-delen har en belægning ("coated") med SCR-katalytisk materiale. Dette materiale kan omdanne NO<sub>x</sub> til kvælstof (N<sub>2</sub>) og vand. System 2 har samme dimensioner som System 1, men kræver dog ureaindsprøjtninger (AdBlue), hvorfor en ureadyse er påmonteret systemet. Desuden er der monteret et række sensorer til at overvåge NO<sub>x</sub>-reduktionen (bl.a. måling af NO<sub>x</sub>-koncentration før/efter samt temperatur).

Endelig har systemet "Active Temperature Control", hvilket sikrer, at røggassen hurtigt opnår den rette temperatur, således at katalysatoren er aktiv. Dette vurderes ideelt for denne anvendelse grundet driftsmønster med store udsving i røggastemperatur (skiftende perioder mellem tomgang og maksimal belastning).

Partikelfiltre med integreret SCR er pladsbesparende og billigere end en løsning med separat DPF og SCR, hvilket især i mindre maskiner og små bilmotorer kan være en stor fordel. Der kan dog være udfordringer med at opnå tilfredsstillende virkningsgrader på reduktionen af NO<sub>x</sub>.

### 6.4.3 System 3: DOC, DPF og SCR

System 3 er opbygget med separat DPF og SCR (se FIGUR 7). Denne løsning er den dyreste, men har også den bedste virkningsgrad ift. NO<sub>x</sub>. Systemet har også sensorerne til monitorering af NO<sub>x</sub>-reduktion påmonteret og har "Active Temperature Control", som det også var tilfældet for System 2.



FIGUR 7. Skitse over opbygning af System 3 (DOC, DPF og SCR).

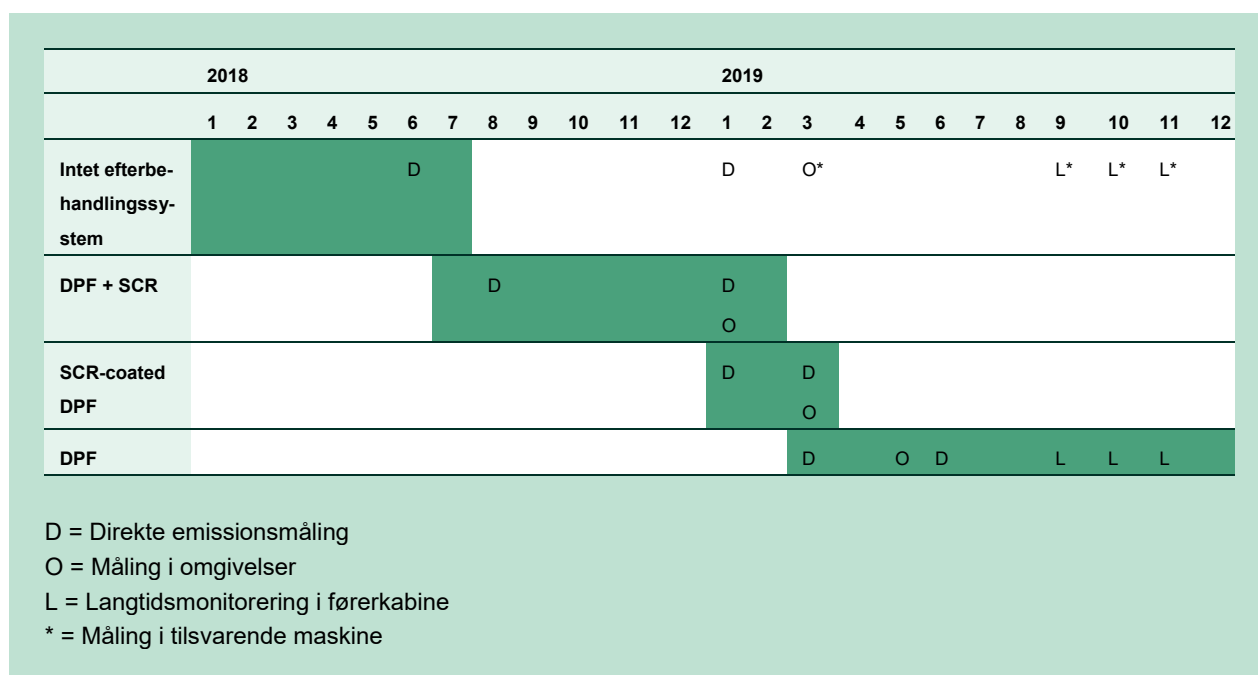
# 7. Systemernes virkningsgrad og målinger i nærmiljøet

## 7.1 Overblik over målinger i projektet

For alle tre efterbehandlingssystemer er de direkte emissioner analyseret umiddelbart efter installation og efter en driftsperiode på to-tre måneder. Der er derudover foretaget referencemålinger uden efterbehandlingssystem over to omgange.

Der er desuden målt på luftkvaliteten i omgivelserne omkring maskinen. Målingen er udført for alle tre løsninger samt for en lignende maskine uden påmonteret efterbehandlingssystem. Endelig er der foretaget en kontinuert langtidsmåling af partikelniveauet i førerkabinen på maskinen (med DPF påmonteret) samt på en tilsvarende maskine uden eftermonteret røgrenningsudstyr.

En tidslinje over de udførte målinger på de tre efterbehandlingssystemer er vist i FIGUR 8.



**FIGUR 8.** Tidslinje over de udførte målinger i projektet for hvert af de tre udviklede efterbehandlingssystemer.

### 7.1.1 Udstyr til direkte emissionsmåling

I forhold til partikelmålingen har udgangspunktet været at læne sig op ad det såkaldte PMP (Particle Measurement Program), som definerer den målemetode, der benyttes til at måle partikelemission, jf. Euro VI. Jf. PMP måles udelukkende den faste partikelfraktion med henblik på at kunne reproducere målinger, og samtidig omfattes kun partikler større end 23 nm ( $d_{50}$ ).<sup>12</sup> Derfor er der til de direkte emissionsmålinger anvendt TSI NanoScan SMPS Nanoparticle Sizer 3910 til karakterisering af partikelantalskoncentration og partikelstørrelsesfordeling for par-

<sup>12</sup> <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2007/wp29grpe/PMP-2007-18-02e.pdf>

tikler i størrelsen 10–420 nm i 13 størrelsesfraktioner. Udstyret har været direkte tilkøbet udstødningsrøret på maskinen igennem en fortynder (Diluter Testo MD19-3E) og en katalytisk stripper (Catalytic Instruments CS015).

Til måling af gaskoncentrationen af regulerede udstødningsgasser (NO, NO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>) er der anvendt en PEMS (Portable Emissions Measurement System) fra AVL. Systemet måler CO og CO<sub>2</sub> med princippet NDIR, mens NO og NO<sub>2</sub> måles med princippet NDUV. De målte værdier logges på computer hvert sekund, og gennemsnittet for den målte periode beregnes.

Ved målingerne er maskinen blevet belastet med en hydraulisk modstand, bestående af en reduktionsventil og et flowmeter indsat i maskinens hydrauliske kreds. Den hydrauliske effekt kan principielt beregnes som produktet af trykfald og volumenstrøm, men eftersom virkningsgraden af hydraulikpumpe og systemet som helhed er ukendt, vil en sådan beregning ikke være særligt præcis.

Belastningen blev først tilpasset, så motoren var tæt på sin maksimale ydelse, hvilket kunne ses ved, at motoren blev tvunget ned i omdrejninger. For at opnå ca. 50 % af denne belastning blev trykfaldet over den hydrauliske modstand halveret, hvilket teoretisk set burde betyde, at den hydrauliske effekt også blev halveret. Endelig blev der udført målinger i tomgang, hvor den hydrauliske kreds ikke var indkøbet.

Målingerne med belastning blev udført ved et omdrejningstal på 1800 rpm, mens tomgangs-målingerne blev udført ved 850 rpm.

### **7.1.2 Udstyr til målinger i omgivelserne**

I forhold til måling af luftkvaliteten i omgivelserne omkring maskinen blev partikelantalskoncentration målt kontinuerligt med en CPC (Condensation Particle Counter) (model 3007, TSI Inc). Instrumentet tæller partikler i størrelsesintervallet 10-1.000 nm (0,01-1 µm) med en tidsopløsning på 5 sekunder. Dette eller tilsvarende instrumenter benyttes hyppigt til måling af partikelantalskoncentration i omgivelserne.

Partikelmassekoncentration blev målt kontinuerligt med en DustTrak DRX (model 8533, TSI Inc.). Instrumentet måler partikelmasse i størrelsesområdet ~0,1-15 µm og i koncentrationsområdet 0,001–150 mg/m<sup>3</sup>. Apparatet måler i størrelsesfraktionerne PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>4</sub>, PM<sub>10</sub> og PM<sub>total</sub> med en tidsopløsning på 10 sekunder. Massebestemmelsen er baseret på laser-diffraktion.

Partikelkoncentrationen (antal og masse) blev målt i en afstand af 1-10 meter fra maskinen over en længere periode, hvor maskinen opererede under normale driftsforhold. Forud for målingerne er baggrundsniveauet på den pågældende lokation blevet målt, da baggrundsniveauet er væsentlig forskelligt, alt efter om maskinen har været placeret i indre by eller ved afsides villakvarterer.

Det skal bemærkes, at disse målinger er forbundet med væsentlige usikkerheder, grundet forhold uden for vores kontrol såsom vind, vejr og øvrig trafik i området. Derfor er resultaterne (afsnit 7.3) udregnet som et gennemsnit over måleperioden.

## **7.2 Direkte emissioner: virkningsgrad for de tre systemer**

Den beregnede effektivitet i forhold til at reducere partikelantallet og NO<sub>x</sub>-koncentrationen for de tre efterbehandlingssystemer er angivet i TABEL 1. Der ses for alle tre løsninger en virkningsgrad overfor partikler på over 99,7 %, udregnet som den gennemsnitlige reduktion af partikelantal for både tomgang og forskellige grader af motorbelastning.

Der observeres, som forventet, ingen NO<sub>x</sub>-reduktion for System 1, da dette system udelukkende består af et dieselpartikelfilter. For System 2 er der ved motorbelastning beregnet en reduktion på 40-50 % og ved tomgang en reduktion på 5-10 %. Det mest effektive system er System 3, idet der er beregnet en NO<sub>x</sub>-reduktion på 95-97 % ved en motorbelastning på 20-30 % ved tomgang.

Beregningerne er baseret på de målte koncentrationer, mens der er anvendt estimater for motorens luft- og brændstofforbrug og for ydelsen.

**TABEL 1.** Oversigt over de tre systemers effektivitet i forhold til reduktion af partikler og NO<sub>x</sub>.

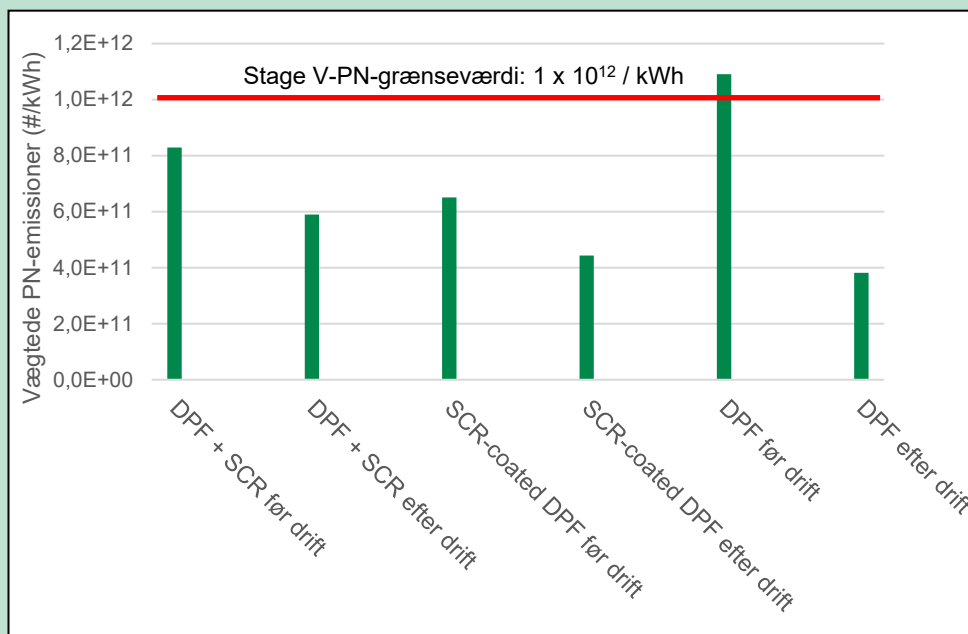
Efterbehandlings-system	Driftstid	Motorbelastning	Partikelreduktion	Middel partikelreduktion	NO <sub>x</sub> -reduktion
System 1 (DPF)	Ingen	Tomgang	99,4 %	99,7 % ± 0,2 %	-
		Halv	99,7 %		
		Fuld	99,5 %		
	Ca. 4 mdr.	Tomgang	99,8 %		
		Halv	99,9 %		
		Fuld	99,9 %		
System 2 (SCR-coated DPF)	Ingen	Tomgang	99,5 %	99,8 % ± 0,1 %	Tomgang: 5-10 %
		Halv	99,8 %		
		Fuld	99,8 %		
	Ca. 3 mdr.	Tomgang	99,8 %		Halv/fuld
		Halv	99,9 %		Belastning: 40-50 %
		Fuld	99,9 %		
System 3 (DPF + SCR)	Ingen	Tomgang	99,6 %	99,7 % ± 0,1 %	Tomgang: 20-30 %
		Halv	99,8 %		
		Fuld	99,7 %		
	Ca. 6 mdr.	Tomgang	99,6 %		Halv/fuld
		Halv	99,8 %		Belastning: 95-97 %
		Fuld	99,8 %		

### 7.3 Vægtede emissioner af partikler og NO<sub>x</sub> samt sammenligning med Stage V-krav

De beregnede emissioner under belastning og i tomgang er vægtet med 45 % for hver af de to målinger under belastning, og 10 % for tomgang. Vægtningen er udført for at nå frem til én værdi for NO<sub>x</sub> og PM, som kan sammenlignes med Stage-kravene.

Non-road-motorer fra Stage IIIB skal gennemgå en testprocedure, hvor de opstilles i en testbænk og gennemkører både en transient test og en test med otte faste belastningspunkter, hvor emissionerne for Stage-standarden skal overholdes i begge test. Idet de gennemførte målinger kun omfatter to belastninger samt tomgang, er sammenligningen med grænseværdierne i Stage-standarden kun vejledende.

De vægtede specifikke PN-emissioner er vist i FIGUR 9. I alle tilfælde, undtagen første måling med det rene partikelfilter, er grænseværdien for PN overholdt. Variationerne skyldes højst sandsynligt forskelle i filterets fyldningsgrad og i varigheden af målingen. Et nyligt regenereret partikelfilter vil lukke flere partikler igennem, ligesom en langvarig måling ved høj belastning også vil brænde partikelmassen i filteret af og dermed reducere effektiviteten.

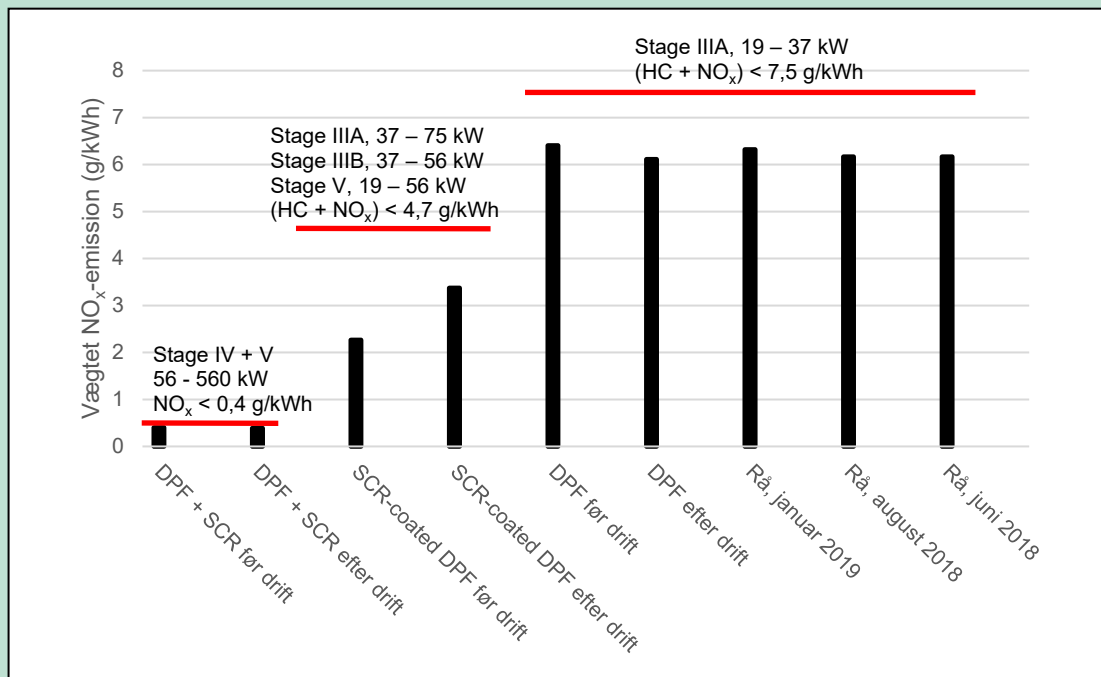


**FIGUR 9.** ISO 8178 C1-vægtede PN-emissioner og Stage V-grænseværdi for PN.

De vægtede emissioner af NO<sub>x</sub> er vist i FIGUR 10. Den opnåede reduktion er størst med separat DPF og SCR, mens der som forventet ikke ses en reduktion med DPF alene. På den røde linje er angivet de Stage-standarder som NO<sub>x</sub>-emissionerne ligger under med de tre forskellige systemer.

Det bemærkes, at der er forskellige emissionsgrænser for NO<sub>x</sub> i de forskellige effektklasser, hvorfor fx System 2 med coated DPF forventeligt vil kunne overholde Stage V-grænseværdien på 4,7 g/kWh for maskiner under 56 kW, men ikke grænseværdien på 0,4 g/kWh for maskiner over 56 kW.





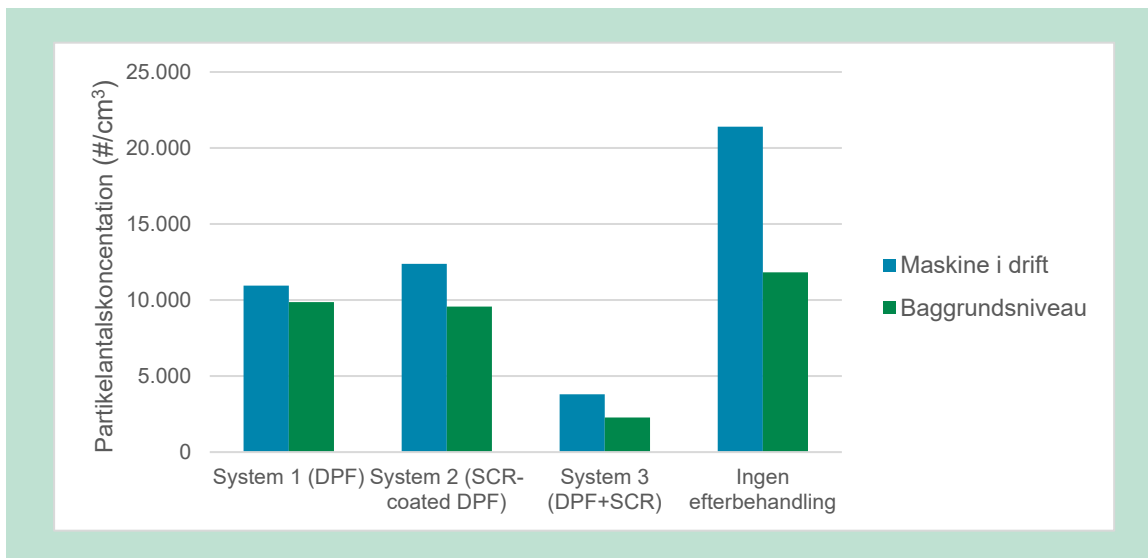
FIGUR 10. ISO 8178 C1-vægtede NO<sub>x</sub>-emissioner og Stage V-grænseværdi for NO<sub>x</sub>.

## 7.4 Målinger i nærmiljøet

Resultaterne for måling af partikelantalskoncentration i nærmiljøet omkring maskinen er præsenteret i FIGUR 11. Baggrundsniveauet i partikelantalskoncentration ligger typisk fra nogle få tusind partikler/cm<sup>3</sup> til ca. 10.000 partikler/cm<sup>3</sup> i urbane områder, hvormed der næsten sker en fordobling i partikelantal omkring maskinen uden efterbehandlingssystem. Den målte stigning i partikelniveauet omkring maskinen med et af de tre systemer påmonteret er 1.000-3.000 #/cm<sup>3</sup>. For maskinen uden efterbehandlingssystem er der derimod målt en stigning på 9.500 #/cm<sup>3</sup> i forhold til baggrundsniveauet.

Dermed er der målt en signifikant højere partikelkoncentration i nærmiljøet omkring en maskine uden efterbehandlingssystem sammenlignet med en tilsvarende maskine med efterbehandlingssystem.

På baggrund af interviews med brugere af maskinen er det også konkluderet, at der opleves langt færre lugtgener ved arbejde omkring maskinen med System 2 eller System 3 monteret. En forklaring på dette kan være systemernes evne til at reducere gasemissioner og i nogen grad også evnen til at reducere partikelemissionen, da lugtende kemiske forbindelser kan være bundet til partiklerne.



**FIGUR 11.** Partikelantalskoncentration målt i nærmiljøet omkring maskinen for hvert af de tre systemer samt for maskinen uden efterbehandlingssystem.

## 7.5 Langtidsmonitorering i førerkabine

Der er i projektet desuden udviklet en sensorboks til langtidsmonitorering af partikkelmasse i førerkabinen. Sensorboksen er udstyret med sensorer til måling af PM2.5 (Model SDS011), temperatur og relativ luftfugtighed (Model AM2302). Det har desuden været muligt at følge partikelkoncentrationen i realtid, online på web, i løbet af monitoreringsperioden. Der har været særlig fokus på at udvikle en kosteffektiv og robust monitoreringsenhed.

Der har været installeret to ens sensorbokse i maskiner med hhv. uden DPF. Det samlede gennemsnit i forhold til eksponering viser, at partikkelmassekonzentrationen i førerkabinen i maskinen med DPF har været cirka 50 % lavere end i maskinen uden DPF (se TABEL 2). Dette stemmer godt overens med de målte partikelantalskoncentrationer i nærmiljøet (se afsnit 7.4), hvor der ligeledes blev målt et signifikant lavere partikelniveau for maskinen med efterbehandlingssystem monteret.

De anvendte partikkelmassesensorer er blevet testet i laboratorieopstilling ved Teknologisk Institut, hvor der blev fundet en god overensstemmelse mellem målingerne for de to sensorer ( $\pm 10\%$ ). Det vurderes således, at den målte relative forskel er signifikant og retvisende. Den absolutte partikkelmassekonzentration er ligeledes blevet testet i laboratorieopstilling ved sammenligning med avanceret partikkelmasseinstrument. Resultatet viste, at den absolutte partikkelmassekonzentration målt med sensorerne generelt er forskellig fra massen målt med mere avanceret udstyr. Dermed skal der tages forbehold for en væsentlig usikkerhed i forhold til det angivne ved den absolutte partikkelmassekonzentration.

Den målte driftstid har været sammenlignelig mellem de to maskiner. Desuden har omgivelserne (luftfugtighed og temperatur) været meget sammenlignelige, hvilket ellers potentielt ville kunne påvirke disse analyser.

**TABEL 2.** Langtidsmonitorering af partikkelmasse i førerkabine.

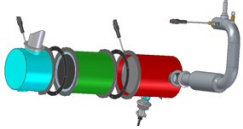
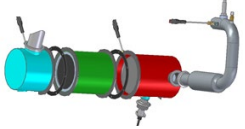
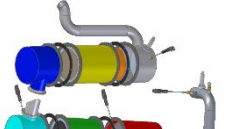
	PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	RH (%)	T (C)	Antal datapunkter	Driftstid (timer)
Maskine uden DPF	5,6	54,3	21,7	27.169	151
Maskine med DPF	2,8	49,7	22,6	26.855	149

## 7.6 Samlet overblik over evalueringsparametre

Alle tre systemer medfører en meget effektiv reduktion af partikler på over 99,7 %. For System 2 og System 3, som indeholder SCR-teknologi, er der målt gennemsnitlige NO<sub>x</sub>-reduktioner på henholdsvis 40-50 % og 95-97 %. Projektets hovedresultater og væsentligste obspunkter for en maskinejer i forbindelse med eftermontering af røgrensningsudstyr er desuden opsummeret nedenfor i TABEL 3. Alle tre systemer medfører, at maskinens partikeludledning reduceres til et niveau, der er sammenligneligt med, hvad en Stage V-maskine over 19 kW må udlede. På NO<sub>x</sub>-siden medfører System 2, at NO<sub>x</sub>-udledningen reduceres til, hvad en Stage V-maskine på 19-56 kW må udlede, og for System 3 svarer NO<sub>x</sub>-udledningen til, hvad en Stage V-maskine på 56-560 kW må udlede<sup>13</sup>.

I nærmiljøet omkring maskinen med et af de tre systemer monteret måles ingen signifikant forskel i partikelniveau i luften, på trods af at der arbejdes med maskinen. Til sammenligning blev partikelniveauet i luften fordoblet i forhold til baggrundsniveauet omkring en tilsvarende maskine uden efterbehandlingssystem monteret.

**TABEL 3.** Evalueringsmatrix.

	System 1 DPF	System 2 DPF med SCR-coating	System 3 DPF + SCR
			
Kompatibel med	Takeuchi TB260 (35,5 kW)		
Virkningsgrad, partikler - tomgang til fuld belastning	> 99,7 %	> 99,7 %	> 99,7 %
Virkningsgrad, NO <sub>x</sub> - tomgang - 50-100 % belastning	- -	5-10 % 40-50 %	20-30 % 95-97 %
Miljøforbedring omkring maskinen (nærmiljøet)	I nærmiljøet måles ingen signifikant forskel i partikelniveau i luften, hvad enten motoren er tændt eller ej. Der er ikke målt NO <sub>x</sub> i nærmiljøet.		
Tid før systemet er effektivt	Ingen	Partikelreduktion: Effektiv ved motorstart NO <sub>x</sub> -reduktion: Omkring 5-10 minutter.	
Pris <sup>14</sup>	35.000-40.000 kr.	55.000-60.000 kr.	70.000-75.000 kr.
Vedligeholdelse	Årlige serviceudgifter er 2.000-3.000 kr.	AdBlue-tanken skal genopfyldes ved ca. 500 liter dieselforbrug. AdBlue-forbrug er ca. 5 % af dieselforbruget. Årlige serviceudgifter er 3.000-5.000 kr.	
Levetid	5+ år	5+ år	5+ år
Tilsvarende Stage-krav for PN-emission	Stage V	Stage V	Stage V
Tilsvarende Stage-niveau for NO <sub>x</sub> -emission (estimeret) <sup>1</sup>	Stage IIIA	Stage V (19-56 kW)	Stage V (56-560 kW)

<sup>13</sup> Baseret på en række antagelser, som er nærmere beskrevet i afsnit 7.3.

<sup>14</sup> Priserne er baseret på et styktal på mindst 10-20 identiske systemer.

## 7.7 Potentiale for udbredelse

Det vurderes, at potentialet for udbredelsen af efterbehandlingssystemerne afhænger meget af, hvilke krav der stilles fra myndigheder/bygherrer, idet projektets parter ikke forventer, at der i nævneværdig grad vil blive monteret efterbehandlingsudstyr på maskiner, hvor det ikke er påkrævet. Udover krav fra bygherrer/myndigheder kræves ikke mindst også, at samme myndighed eller bygherre efterfølgende udfører kontrol med, at de anvendte maskiner overholder de krav, som er blevet stillet.

Det vurderes desuden, at efterbehandlingssystemerne især vil være attraktive at montere på specialmaskiner, som har en markant længere driftsperiode end mere almindelige maskiner, hvor alternativet til efterbehandling er udskiftning til nye maskiner, som fra producentens side er udstyret med effektiv røgrønsning.

En væsentlig pointe er desuden, at hvis en maskinejer monterer efterbehandlingsudstyr på en maskine, er det afgørende, at kravene til dokumentation er klare, så maskinejeren kan fremskaffe den nødvendige dokumentation overfor bygherre/myndighed. Der er fx markant forskel på, om effektiviteten af et efterbehandlingssystem skal dokumenteres med en omfattende måling med motoren i en testbænk, eller om det er tilstrækkeligt at foretage en emissionsmåling i felten med mere simpelt måleudstyr, hvor der fx måles partikelkoncentration (antal partikler/cm<sup>3</sup>) i stedet for antal partikler/kWh. I Schweiz har myndighederne i flere år således arbejdet med en "comparison value" på 250.000 partikler/cm<sup>3</sup>, som er grænseværdien for partikelantal, som skal overholdes af alle maskiner større end 18 kW<sup>15</sup>.

Det er oplagt at opstille lignende krav til maskiner med eftermonterede systemer i Danmark, som omfatter grænseværdier for både partikelantal (PN) og NO<sub>x</sub>. Grænseværdierne kunne baseres på en undersøgelse af de faktiske emissioner fra godkendte maskiner bestemt med simple feltmålinger og simpelt udstyr, som kan betjenes af kontrollerende myndigheder med henblik på opfølgende kontroller.

---

<sup>15</sup> Ordinance on Air Pollution Control (OAPC) i Schweiz: <https://www.admin.ch/opc/en/classified-compilation/19850321/index.html>

### **Røgrensning til mindre entreprenørmaskiner**

Projektet er gennemført i perioden 2018-2019 og havde det overordnede formål at videreudvikle, implementere og evaluere 3 forskellige teknologier til røgrensning på eksisterende mindre entreprenørmaskiner med henblik på at reducere luftforureningen. Der er i projektet blevet udviklet og integreret tre forskellige efterbehandlingssystemer til røgrensning, som alle er blevet analyseret i forhold til emissionsreduktion overfor partikler og gasser. Projektet har vist, at det er teknisk muligt at integrere både simple og mere avancerede kombinationsløsninger af partikelfilter og NOx-reducerende SCR-katalysator på en mindre gravemaskine. Der kan opnås en meget effektiv emissionsreduktion, målt som både den direkte emission i udstødningsgasen og i nærmiljøet omkring maskinen under realistiske driftsbetingelser, uden at det i øvrigt har negativ indflydelse på hverken maskinen eller driftssikkerheden.



Miljøstyrelsen  
Tolderundsvej 5  
5000 Odense C

[www.mst.dk](http://www.mst.dk)