

Denne artikel er udgivet i det elektroniske tidsskrift
Artikler fra Trafikdage på Aalborg Universitet
(Proceedings from the Annual Transport Conference
at Aalborg University)
ISSN 1603-9696
<https://journals.aau.dk/index.php/td>

Grønne emissionstiltag for arbejdsmaskiner på en byggeplads

Morten Winther^{1}, Rasmus F. Cordtz², Lars Overgaard²*

¹Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet, Roskilde

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

²Teknologisk Institut

Abstrakt

I projektet "Fremtidens grønne byggeplads" beregnes emissionskonsekvenserne af at indføre grønne emissionstiltag for maskinerne på byggepladsen. Der regnes på et basisscenarie med off-road diesel (B0), og fem forskellige grønne emissionstiltag: HVO biodiesel, mild elektrisk hybridisering af en pæleboremaskine, 10 % tomgangstid for gravemaskiner samt elektrificering af alle gravemaskiner og alle maskiner på pladsen.

Samlet set for alle scenarier, opnås de største reduktioner i energiforbruget og NO_x- og PM-emissionerne ved at elektrificere alle maskinerne på byggepladsen. De beregnede besparelser i energiforbruget, NO_x- og PM-emissionerne er på hhv. 38 %, 85 % og 66 %, set i forhold til basisscenariet. I fremtiden forventes endnu større NO_x- og PM-emissionsbesparelser, efterhånden som andelen af sol- og vindenergi stiger i det danske energisystem. Ved fuld elektrificering sker alle udledninger på kraftværkerne og gevinsten for den lokale luftkvalitet bliver derfor maksimal (nulemission af NO_x og PM). For CO₂ opnås emissionsbesparelser på 87 % i HVO-, hybrid- og tomgangs-scenarierne, hvor alle maskinerne bruger HVO.

For gravemaskiner alene opnås en energibesparelse på 38 %, og CO₂- og NO_x-emissionsreduktioner på hhv. 75 % og 6 % ved elektrificering, set i forhold til basisscenariet. Den lille NO_x-reduktion skyldes det noget lavere energiforbrug, da NO_x-emissionsfaktoren for elforbruget samlet set er højere end ved brug af B0 (og HVO). PM-emissionerne bliver mere end 11 gange højere ved elektrificering, pga. kraftværkernes høje PM-emissioner. NO_x- og PM-emissionerne fra kraftværkerne forventes at falde i fremtiden, i takt med at andelen af sol- og vindenergi stiger i det danske energisystem. De lokale emissioner er dog nul. For gravemaskiner opnås de største emissionsreduktioner i tomgangs-scenariet. Her falder de beregnede NO_x-, PM- og CO₂-emissioner med hhv. 8 %, 1 % og 87 % i forhold til basis, og energiforbruget falder med 4 %.

For pæleboremaskinen opnås ved elektrificering en energibesparelse på 38 %, og NO_x- og CO₂-emissionsfald på hhv. 32 % og 75 %. NO_x-reduktionen i procent bliver mindre end reduktionen i energiforbruget, og PM-emissionerne bliver mere end 9 gange højere end i basisscenariet, af samme årsag som nævnt for gravemaskiner. De lokale emissioner er dog nul. I mild hybrid-scenariet (hvor pæleboremaskinen bruger HVO) beregnes et uændret energiforbrug for pæleboremaskinen, mens NO_x- og CO₂-emissionerne falder med hhv. 18 % og 87 % og PM-emissionen stiger med knap 3 %, set i forhold til basisscenariet.

1. Indledning

I bygge- og anlægsbranchen er der stor fokus både på Danmarks 2030 klimamål og lokal luftforurening fra byggepladser, særligt i bynære områder. Projektet "Fremtidens grønne byggeplads" ([Projekt - Fremtidens Grønne Byggeplads - Teknologisk Institut](#)) undersøger effekten af forskellige energi-, -miljø og klimavenlige tiltag på en byggeplads i Aarhus. Det er ambitionen, at projektets resultater kan medvirke til at give branchen et bedre grundlag for at træffe klima- og miljørigtige beslutninger.

Fremtidens grønne byggeplads er et såkaldt fyrtårnsprojekt der er støttet af Miljøstyrelsens MUDP-program. Projektet udføres i et samarbejde mellem Per Aarsleff A/S, Zeppelin Rental Danmark (tidligere CP), Volvo Entreprenørmaskiner A/S, DevLabs (tidligere Airlabs Denmark), Alumichem A/S, Danmarks Tekniske Universitet, Aarhus Universitet og Teknologisk Institut. Projektet gennemføres i tæt samarbejde med bygherre Ejendomsselskabet Olav de Linde A/S. Projektperioden er januar 2021 – juni 2024.

I projektet måles med et netværk af sensorer bl.a. påvirkningen af luftkvaliteten, når arbejdsmaskiner med og uden partikelfilter og SCR-katalysator anvendes på byggepladsen. Projektet undersøger også hvordan anvendelse af maskiner, og herunder klima- og miljøpåvirkning, kan optimeres for maskinerne på pladsen vha. biobrændstoffer, drivlinjearkitektur, ecomode funktioner, adfærd, sensorteknologi og lokationsdata. Et yderligere vigtigt aspekt af projektet er undersøge potentialet ved at etablere intelligent byggestrøm og en smart energi infrastruktur på byggepladsen, herunder solceller og varmepumper på intelligent styrede, overvågede og velisolerede skurvogne i kombination med energilagring til udjævning af belastning på byggestrøm. Øget elektrificering forventes de kommende år at udfordre byggepladsernes byggestrøm som forventeligt får behov for øget digitalisering, styring og energilagring.

Projektet vedrører også scenarieanalyser, hvor der regnes på emissionskonsekvenserne af at indføre yderligere grønne emissionstiltag for maskinerne på byggepladsen. Scenarieberegningerne udføres af DCE (Nationalt Center for Miljø og Energi) under ved Aarhus Universitet i samarbejde med Teknologisk Institut. Der arbejdes teoretisk på følgende tiltag:

Scenarier ift. trinvis implementering af tiltag på byggepladsens entreprenørmaskiner:

- Basis scenarie – maskinerne på pladsen benytter off-road diesel (B0)
- HVO scenarie – maskinerne på pladsen benytter HVO biodiesel (HVO)
- Mild elektrisk hybridisering af pæleboremaskine, og maskinen benytter HVO
- Reduktion af tomgangstid for gravemaskiner, og maskinerne benytter HVO
- Fuld elektrificering af gravemaskiner
- Fuld elektrificering af samtlige maskiner

Denne præsentation forklarer emissionskonsekvenserne for CO₂, NO_x og PM ved indførelse af hver af de fem grønne emissionstiltag, set ift. basisscenariet.

2. Metode

I det følgende gives en oversigt over maskindata for de entreprenørmaskiner, der er brugt på byggepladsen, samt de akkumulerede maskintimer pr. maskine, der er opdelt i timer i operationsfase og lav last/tomgang.

2.1. Maskindata for entreprenørmaskinerne

Til brug for emissionsberegningerne i projektet har Aarsleff A/S oplyst følgende data for arbejdsmaskinerne på byggepladsen: Maskintype, model, årgang, motorstørrelse (kW), EU/US stage norm og typer af påmonteret emissions-efterbehandlingsudstyr (Tabel 1).

Maskintype	Model	Årgang	Nominel effekt kW	Emissionstrin EU/US stage	Efterbehandlingsudstyr
Pæleboremaskine	Bauer BG 36V	2017	404	EU IV	DOC, DPF, SCR & NH3 slip
Pæleboremaskine	Bauer BG 55V	2017	563	US 4f	DOC
Gravemaskine	CAT 325F L	2017	122	EU IV	DOC, DPF, SCR & NH3 slip
Gravemaskine	CAT 335FL CR	2016	149	EU IV	DOC, DPF, SCR
Gravemaskine	Hitachi ZX135US-6	2019	74,9	EU IV	DOC, DPF, SCR
Gravemaskine	Hitachi ZX135US-6	2021	74,9	EU IV	DOC, DPF, SCR
Gravemaskine (lang arm)	Volvo EC300 ELR	2017	159	EU IV	DOC, DPF, SCR
Ankerboremaskine	Hütte 609	2011	190	EU IIIA	DOC
Ankerboremaskine	Klemm KR 806-3G	2016	160	EU IV	DOC, SCR

Derudover har Aarsleff A/S fremsendt data for antal timer under operation og lav last/tomgang i perioden (Tabel 2). De procentvise motorbelastninger ved lav last/tomgang er anslået af TI (2024)¹. De procentvise gennemsnitlige motorbelastninger ved operation er beregnet så et samlet beregnet brændstofforbrug stemmer overens med det oplyste brændstofforbrug for hver enkelt maskine, og som er forklaret i afsnit 2.4.

Maskintype	Model	Maskintimer				Motorbelastning	
		Tændt Timer	Operation Timer	Lav last/ tomgang Timer	Lav last/ tomgang Andel	Operation	Lav last/ tomgang
Pæleboremaskine	Bauer BG 36V	214,75	171,11	43,64	0,20	29,7	5,5
Pæleboremaskine	Bauer BG 55V	1077,04	827,81	249,23	0,23	32,1	5,5
Gravemaskine	CAT 325F L	186,19	139,54	46,65	0,25	46,6	2,58
Gravemaskine	CAT 335FL CR	169,90	118,30	51,60	0,30	42,2	2,58
Gravemaskine	Hitachi ZX135US-6	1128,54	888,61	239,93	0,21	45,9	2,58
Gravemaskine	Hitachi ZX135US-6	1285,82	968,70	317,12	0,25	45,4	2,58
Gravemaskine (lang arm)	Volvo EC300 ELR	193,30	125,14	68,16	0,35	25,2	2,58
Ankerboremaskine	Hütte 609	500	350	150	0,30	8,8	5,5
Ankerboremaskine	Klemm KR 806-3G	500	350	150	0,30	8,2	5,5

2.2. Beskrivelse af scenarier

I det følgende gives en beskrivelse af de forskellige scenarier, det er valgt at beregne energi- og emissionskonsekvenser for i projektet.

Basis scenarie – maskinerne bruger off-road diesel (B0)

Den situation, hvor maskinerne på pladsen antages at benytte almindelig off-road diesel (i det følgende benævnt ved varenavnet B0) benævnes som basisscenariet. Dette valg gøres, selvom maskinerne på byggepladsen rent faktisk udelukkende har brugt HVO biodiesel (i det følgende blot kaldet HVO) i byggeperioden, fordi B0 i dagens situation er det mest anvendte brændstof for entreprenørmaskiner i bygge- og anlægsbranchen.

¹ En tomgangsbelastning på 5,5 % er bestemt af CAN bus data, der er logget over en arbejdsdag for pæleboremaskinen Bauer BG 36V. Denne tomgangsbelastning er brugt for de øvrige boremaskiner på byggepladsen. En tomgangsbelastning på 2,58 % er bestemt af CAN bus data, der er logget over adskillige minutter på CAT 325F L. Denne tomgangsbelastning er brugt for de øvrige gravemaskiner på byggepladsen.

Forbrugsdata for maskinerne er oplyst i liter HVO som inputdata til projektets beregninger. Omregningen af forbrugsdata i liter HVO til liter B0, er gjort for hver enkelt maskine ved at antage 1) at motoren, uanset brændstoftype, har det samme specifikke energiforbrug, forstået som MJ indfyret energi pr. kWh mekanisk arbejde leveret af motoren, og 2) derudover anvendes værdier for massefylde og nedre brændværdi (vist i Tabel 4) for de to brændstoffer i omregningen.

HVO scenarie – maskinerne bruger HVO biodiesel

Maskinerne på byggepladsen har brugt HVO i hele byggeperioden. Det er valgt at benævne dette udgangspunkt som HVO-scenariet i paperet, fordi B0 som tidligere nævnt er det mest anvendte brændstof for entreprenørmaskiner indenfor bygge- og anlægsbranchen.

Mild-elektrisk hybridisering af pæleboremaskine

I dette scenarie antages der en mild elektrisk hybridisering af en af pæleboremaskinerne på pladsen (Bauer BG 36V). I scenariet tænkes et større batteri at skulle tilføre den nødvendige strøm til en elmotor, der tages i brug, når maskinen arbejder ved lav last/tomgangsbelastning. Ved at indføre et batteri som energilager kan forbrændingsmotoren køres udelukkende ved operationslast og dermed opnå højere effektivitet og lavere emissioner.

Elektriciteten til batteriet genereres af dieselmotoren i operationsfasen, hvor dieselmotorens operationseffekt øges, så dieselmotorens løftede mekaniske kWh-output svarer til det mekaniske kWh-output, der ydes af dieselmotoren ved lav last/tomgangsbelastning inklusive drivlinje tab. Dette mekaniske output skal elmotoren også kunne levere i scenariet, når der arbejdes ved denne lavlast-belastning.

I scenarieberegningerne tages hensyn til energitab ved generering af strøm til batteri, samt det efterfølgende tab ved afladning af batteri og i den elektriske drivlinje frem til motoraksel. En detaljeret beskrivelse af beregningen af den nødvendige motoreffekt for pæleboremaskinen i operationsfasen er vist i Bilag 1.

10 % tomgangstid for gravemaskiner

I dette scenarie forudsættes der en situation, hvor tidsandelen i tomgang reduceres markant for alle gravemaskinerne på byggepladsen. I scenariet sænkes tomgangs-tidsandelen til 10 %, i stedet for de noget højere tidsandele på mellem 21 % og 49 % der er oplyst i maskindata for gravemaskinerne i Tabel 1.

Fuld elektrificering af gravemaskiner

Af forskellige årsager giver det god mening at starte med at indføre elektrisk drift for de mindre maskiner på byggepladsen. Her tænkes bl.a. på markedstilgængelighed, anskaffelsespris, udgifter til vedligehold, mindre strømbehov til opladning og fleksibilitet i den daglige drift. I dette scenarie beregnes konsekvenserne for energiforbrug og emissioner ved at erstatte de konventionelle gravemaskiner med batteri-elektriske maskiner, der kan oplades på pladsen. Afledt af målinger udført af TI (2024) i dette projekt med en dieseldrevet og en eldrevet gravemaskine, der udfører identisk gravearbejde, regnes med at energiforbruget (indfyret energi) for en elektrisk maskine er 62 % af energiforbruget for dieseldrivlinjen (hvor dieselmotoren benytter HVO).

Fuld elektrificering af alle maskiner

I dette scenarie beregnes konsekvenserne for energiforbrug og emissioner ved at erstatte alle de konventionelle arbejdsmaskiner med batterielektriske maskiner, der kan oplades på pladsen. Som ved elektrificeringen af gravemaskiner i det foregående scenarie regnes der med at energiforbruget (indfyret energi) for en elektrisk maskine er 62 % af energiforbruget for dieseldrivlinjen (hvor motoren bruger HVO).

2.3. Faktorer for brændstofforbrug og emissioner

Tabel 3 viser de specifikke brændstofforbrug og emissionsfaktorer for NO_x og PM i g/kWh for B0 og HVO, der antages for arbejdsmaskinerne på byggepladsen.

Tabel 3 Specifikke brændstofforbrug og emissionsfaktorer for NO _x og PM i g/kWh for B0 og HVO der bruges for arbejdsmaskinerne på byggepladsen									
Scenarie	Maskintype	Model	Specifikt brændstofforbrug		NO _x emissionsfaktor		PM emissionsfaktor		
			Operation g/kWh	Lav last/ tomgang g/kWh	Operation g/kWh	Lav last/ tomgang g/kWh	Operation g/kWh	Lav last/ tomgang g/kWh	
Basis (B0)	Pæleboremaskine	Bauer BG 36V	241	385	0,4	2,56	0,004	0,004	
	Pæleboremaskine	Bauer BG 55V	241	385	-	-	-	-	
	Gravemaskine	CAT 325F L	290	827	0,4	2,56	0,004	0,004	
	Gravemaskine	CAT 335FL CR	290	827	0,4	2,56	0,004	0,004	
	Gravemaskine	Hitachi ZX135US-6	290	827	0,4	2,56	0,004	0,004	
	Gravemaskine	Hitachi ZX135US-6	290	827	0,4	2,56	0,004	0,004	
	Gravemaskine (lang arm)	Volvo EC300 ELR	290	827	0,4	2,56	0,004	0,004	
	Ankerboremaskine	Hütte 609	241	385	3,9204	3,92	0,237	0,237	
	Ankerboremaskine	Klemm KR 806-3G	241	385	0,4	2,56	0,017	0,017	
HVO	Pæleboremaskine	Bauer BG 36V	233	373	0,4	2,56	0,004	0,004	
	Pæleboremaskine	Bauer BG 55V	233	373	-	-	-	-	
	Gravemaskine	CAT 325F L	281	801	0,4	2,56	0,004	0,004	
	Gravemaskine	CAT 335FL CR	281	801	0,4	2,56	0,004	0,004	
	Gravemaskine	Hitachi ZX135US-6	281	801	0,4	2,56	0,004	0,004	
	Gravemaskine	Hitachi ZX135US-6	281	801	0,4	2,56	0,004	0,004	
	Gravemaskine (lang arm)	Volvo EC300 ELR	281	801	0,4	2,56	0,004	0,004	
	Ankerboremaskine	Hütte 609	233	373	3,9204	3,92	0,237	0,237	
	Ankerboremaskine	Klemm KR 806-3G	233	373	0,4	2,56	0,017	0,017	
					g/MJ	g/MJ	g/MJ	g/MJ	
Basis (B0)	Pæleboremaskine	Bauer BG 36V			0,04	0,16	0,0004	0,0002	
	Pæleboremaskine	Bauer BG 55V			0,35	0,24	0,0187	0,0144	
	Gravemaskine	CAT 325F L			0,03	0,07	0,0003	0,0001	
	Gravemaskine	CAT 335FL CR			0,03	0,07	0,0003	0,0001	
	Gravemaskine	Hitachi ZX135US-6			0,03	0,07	0,0003	0,0001	
	Gravemaskine	Hitachi ZX135US-6			0,03	0,07	0,0003	0,0001	
	Gravemaskine (lang arm)	Volvo EC300 ELR			0,03	0,07	0,0003	0,0001	
	Ankerboremaskine	Hütte 609			0,38	0,24	0,0230	0,0144	
	Ankerboremaskine	Klemm KR 806-3G			0,04	0,16	0,0017	0,0010	
HVO	Pæleboremaskine	Bauer BG 36V			0,04	0,16	0,0004	0,0002	
	Pæleboremaskine	Bauer BG 55V			0,35	0,24	0,0187	0,0144	
	Gravemaskine	CAT 325F L			0,03	0,07	0,0003	0,0001	
	Gravemaskine	CAT 335FL CR			0,03	0,07	0,0003	0,0001	
	Gravemaskine	Hitachi ZX135US-6			0,03	0,07	0,0003	0,0001	
	Gravemaskine	Hitachi ZX135US-6			0,03	0,07	0,0003	0,0001	
	Gravemaskine (lang arm)	Volvo EC300 ELR			0,03	0,07	0,0003	0,0001	
	Ankerboremaskine	Hütte 609			0,38	0,24	0,0230	0,0144	
	Ankerboremaskine	Klemm KR 806-3G			0,04	0,16	0,0017	0,0010	

Emissionsfaktorerne er baseret på data for B0 taget fra de nationale emissionsopgørelser (Winther, 2023) samt emissionsmålinger udført af TI i projektet (TI, 2024). Det antages at NO_x og PM emissionsfaktorerne er ens for B0 og HVO.

For Stage IV motorer antages det at NO_x emissionsfaktorerne er mere end 6 gange højere ved lav motorbelastning/tomgang ift. operation, baseret på emissionsmålinger for pæleboremaskinen udført af TI i projektet (TI, 2024). Forklaringen er, at SCR-katalysatoren ikke renses for NO_x i udstødningsgassen ved lav motorbelastning hvor røggastemperaturen er lav.

TI har også udført emissionsmålinger på gravemaskinen CAT325F L i projektet (TI, 2024), der har givet en væsentligt lavere NO_x-emissionsfaktor ved operationsbelastning end emissionsfaktoren brugt i de nationale opgørelser, der svarer til EU's emissionsnorm. Omvendt viser målingerne at NO_x-emissionsforholdet mellem lav last/tomgang og operationslast er meget højere for gravemaskinen end målt for pæleboremaskinen. I dette projekt er det konservativt valgt at regne med et NO_x -emissionsforhold på 6 for lav last/tomgang ift. operation for alle maskiner. Flere måldata vil kunne give et mere præcist billede af NO_x-emissionerne for gravemaskinerne i fremtiden.

Pæleboremaskinen Bauer BG 55V er certificeret efter den amerikanske US norm Tier 4f, og var, på tidspunktet hvor den blev indkøbt, den mest miljøvenlige af den type af maskiner der var tilgængelig på markedet, set i forhold til kravet til arbejdsopgave og motorkraft. Motorstørrelsen for Bauer BG 55V (563 kW) falder lige akkurat uden for den største motorstørrelseskategori 130-560 kW i den amerikanske emissionslovgivning, og maskinen skal derfor i princippet ikke overholde et emissionskrav.

For pæleboremaskinen Bauer BG 55V og ankerboremaskinen Hütte 609 er det konservativt valgt at bygge NO_x emissionsfaktoren på EU-grænseværdien for en Stage IIIA maskine i motorstørrelseskategorien 130-560 kW, vurderet ud fra de to boremaskiners årgange, motorstørrelser og efterbehandlingsudstyr (maskinerne er udstyret med DOC men ikke SCR).

For de to boremaskiner, hvis emissioner antages at ligge på et Stage IIIA niveau, er der i emissionsfaktorerne yderligere taget højde for forøgede NO_x- og PM-emissioner ved både lav motorbelastning/tomgang og den aktuelle motorbelastning under operation, set i forhold til emissionerne for motorerne ved mere optimal motordrift (se f.eks. Winther, 2023).

For alle maskiner er det specifikke brændstofforbrug en del højere ved lav motorbelastning/tomgang pga. en væsentligt dårligere energiudnyttelse i dette motordriftsområde. Beregningen af det specifikke brændstofforbrug for boremaskinerne og gravemaskinerne ved operation og lav last/tomgang er vist i Bilag 1.

For CO₂ bruges en emissionsfaktor på 0,34 kg/liter for HVO hentet fra CircleK (2024)². Emissionsfaktoren kan omregnes til 9,9 g/MJ og 436 g/kg ved brug af data for massefylde og nedre brændværdi for HVO. Emissionsfaktoren oplyst af CircleK indeholder en vis opstrøms emission forbundet med produktionen af HVO, der netop er årsag til CO₂-emissionen. Selve råstoffet til produktionen af brændstoffet, animalsk affald, er rent biogent materiale.

Tabel 4 Data for CO₂ emissionsfaktorer, massefylde og brændværdi for B0 og HVO brugt i projektet

	Enhed	B0	HVO
Massefylde	g/l	0,84	0,78
Nedre brændværdi	MJ/kg	42,7	44,1
CO ₂ -emissionsfaktor	g/MJ	74	9,9
	g/kg	3160	436
	kg/l	2,654	0,34

I beregningerne i dette arbejde bruges for B0 en Tank-to-Wheel emissionsfaktor på 2,654 kg/liter, svarende til 74 MJ/kg og 3160 g/kg, som pr. definition udledes ved selve forbrændingen af brændstoffet.

² Generelt kan emissionsfaktoren for HVO variere afhængig af hvordan brændstoffet er produceret. Der er dog garanteret en CO₂ emissionsreduktion på mellem 65 og 90 % fra brændstofleverandørernes side, ved at benytte HVO i stedet for off-road diesel (B0).

Af hensyn til sammenlignelighed med andre CO₂-emissionsresultater indenfor entreprenørbranchen er det valgt at bruge en emissionsfaktor for HVO, der inkluderer opstrøms emissioner, og en emissionsfaktor for B0 der ikke inkluderer opstrøms emissioner.

En oversigt over CO₂-emissionsfaktorerne, massefylde og brændværdi for B0 og HVO er vist i Tabel 4.

For elforbruget benyttes en CO₂-emissionsfaktor på 107,1 g/kWh for Vestdanmark i 2023, taget fra Energinet.dk (Energinet.dk, 2024b). For NO_x og PM bruges gennemsnitlige emissionsfaktorer for Danmark i 2021, der er det sidste historiske år Energinet.dk har valgt at beregne emissionsfaktorer for i energi-mikset bag det danske elforbrug (Energinet.dk, 2024a). I emissionsfaktorerne fra Energinet.dk er der indregnet et transmissionstab på 4 % fra kraftværk til bruger.

Ved beregningen af emissionsfaktorerne for det danske elforbrug indgår både brændstofforbrug og emissioner relateret til forbrænding på kraftvarmeværkerne og emissionsfri el fra bl.a. sol og vind.

Relateret til forbrænding er der i Energinet.dk's NO_x og PM emissionsfaktorer kun indregnet det danske forbrug af brændsler og dertil knyttede emissioner, fordi Energinet.dk ved at det historiske brændselsforbrug i Danmark er meget større end brændselsforbruget på udenlandske kraftværker, der sammen med udenlandske vedvarende energikilder bruges til at producere den strøm som Danmark importerer fra udlandet, når den indenrigs strømproduktion ikke kan dække det nationale behov. For den udenlandske strøm kendes brændselsfordelingen og de dertil knyttede CO₂ emissioner, men ikke emissionerne af NO_x og PM.

Men efterhånden som de danske kraftvarmeværkers brændselsforbrug udfases pga. indfasningen af sol- og vindenergi, bliver det i stigende grad usikkert kun at lade det danske brændselsforbrug indgå i emissionsfaktorberegningen for den forbrændingsrelaterede del. Som en konsekvens af dette er 2021 det sidste år Energinet.dk har beregnet NO_x og PM emissionsfaktorer for.

Det må dog forventes at emissionsfaktorerne for NO_x, PM og CO₂ fortsat vil falde en del i fremtiden, efterhånden som især kul udfases som brændsel i på de danske kraftvarmeværker. Brændselsmængderne der bruges på de danske kraftvarmeværker forventes således at blive mere end halveret fra 2023 til 2032, ifølge Energinet.dk's prognose publiceret i Miljøredegørelse for 2023 (Energinet.dk, 2024c). Det er dog ikke muligt at beregne præcist hvor meget emissionsfaktorerne vil falde i fremtiden, især pga. manglende prognosedata for den udenlandske strøm der også bruges i det danske elnet.

En oversigt over CO₂-, NO_x- og PM-emissionsfaktorerne for elforbruget i Danmark (Vestdanmark for CO₂; Danmark gennemsnit for NO_x og PM) er vist i Tabel 5. Emissionsfaktorerne er angivet både i g/kWh og i g/MJ.

Tabel 5 CO₂-, NO_x- og PM-emissionsfaktorer for elforbrug i Danmark

	g/kWh	g/MJ
CO ₂	107,1	29,756
NO _x	0,187	0,052
PM	0,021	0,006

2.4. Beregningsmetode

For maskinerne i tomgang anslås en motorbelastning, hvorudfra der kan beregnes en gennemsnitlig motorbelastning i operationsfasen, så det samlede bottom-up beregnede brændstofforbrug stemmer overens med det oplyste brændstofforbrug for hver enkelt maskine.

Brændstofforbruget og emissionerne pr. maskine for hhv. lav motorbelastning/tomgang og operation beregnes som produktet af maskinens motorstørrelse (kW), samt årlige timer på byggepladsen, gennemsnitlig motorbelastning (%) og sammenhørende brændstofforbrugs- eller emissionsfaktorer (g/kWh) i de to driftsfaser:

$$E_{i,j} = P \cdot LF_j \cdot HRS_j \cdot EF_{i,j} \quad (1)$$

Hvor E = brændstofforbrug eller emission, P = motorstørrelse i kW (Tabel 1), LF = gennemsnitlig motorbelastning (Tabel 2), HRS = årlige timer på byggepladsen (Tabel 2), EF = emissionsfaktor i g/kWh (Tabel 3), i = brændstofforbrug eller emissionstype, j = driftsfase.

Den gennemsnitlige motorbelastning i operationsfasen for den enkelte maskine beregnes ud fra (1):

$$LF = \frac{E}{P \cdot HRS \cdot EF} \quad (2)$$

LF = gennemsnitlig motorbelastning (vist i Tabel 2), E = Brændstofforbrug (g), P = motorstørrelse i kW (Tabel 1), HRS = årlige timer på byggepladsen (Tabel 2), EF = specifikt brændstofforbrug i g/kWh (Tabel 3). CO₂ missionen beregnes som produktet af brændstofforbruget beregnet i (1) og emissionsfaktorerne for hhv. BO og HVO.

I scenariet med fuld elektrificering af alle maskiner regnes der med at energiforbruget for den enkelte eldrevne maskine udgør 62 % af energiforbruget for den dieseldrevne maskine der erstattes (jf. scenariebeskrivelsen i afsnit 2.2). Videre omregnet til kWh bliver elforbruget pr. maskine:

$$E_{kWh} = 0,62 \cdot E_{GJ} \cdot 1000/3,6 \quad (3)$$

Hvor E_{kWh} = energiforbruget i kWh for den eldrevne maskine, E_{GJ} = energiforbruget i GJ for den erstattede konventionelle maskine.

Emissionerne fra den enkelte eldrevne maskine beregnes som:

$$E_i = E_{kWh} \cdot EF_i \quad (4)$$

Hvor E = emission i g, E_{kWh} = energiforbruget i kWh for den eldrevne maskine, EF = emissionsfaktor i g/kWh (Tabel 5), i = emissionstype.

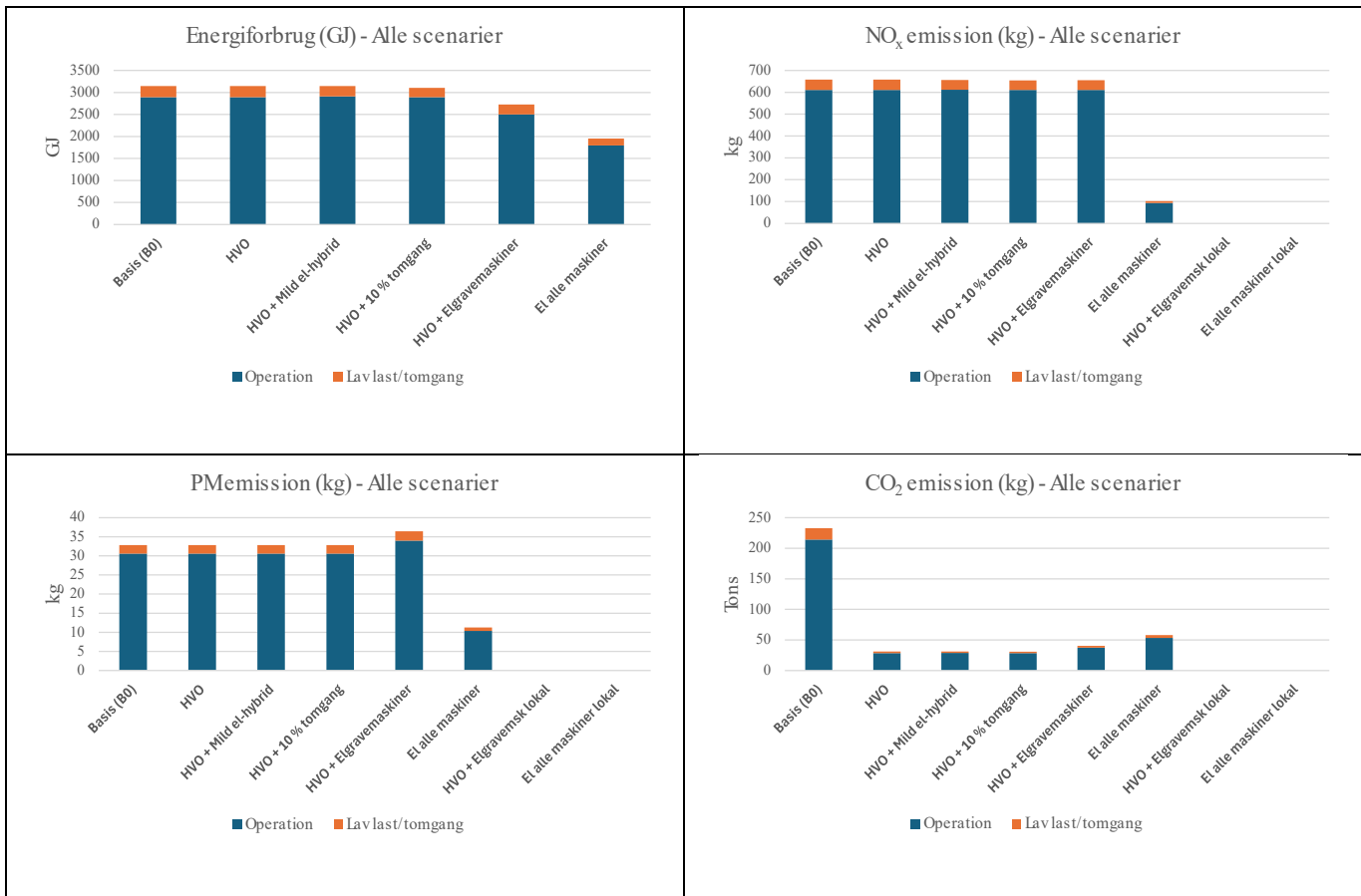
3. Resultater

3.1 Samlet for alle scenarier

Tabel 6 viser de samlede resultater for brændstofforbrug (liter og kg), elforbrug (kWh), energiforbrug (GJ) og NO_x-, PM- og CO₂ emissioner for alle scenarier, og procentvise ændringer i energiforbrug og emissioner i forhold til basisscenariet.

		Tabel 6 Samlede resultater for brændstofforbrug (liter og kg), elforbrug (kWh), energiforbrug (GJ) og NO _x -, PM- og CO ₂ emissioner for alle scenarier, og procentvise ændringer i energiforbrug og emissioner i forhold til basisscenariet.							
Motordrift	Scenarie	Brændstofforbrug		Elforbrug kWh EI	Energi- forbrug GJ	NO _x kg	PM kg	CO ₂ Tons	
		Liter	kg						
Lav last/tomgang	Basis (B0)	6978	5861	0	250	47	2,2	18,5	
	HVO	7276	5675	0	250	47	2,2	2,5	
	Mild elektrisk hybridisering	6813	5314	0	234	44	2,2	2,3	
	10 % tomgangstid	6099	4758	0	210	44	2,2	2,1	
	Elektrificering af gravemaskiner	5530	4313	10345	227	44	2,4	3,0	
	Elektrificering alle maskiner	0	0	43103	155	8	0,9	4,6	
Operation	Basis (B0)	80718	67803	0	2895	611	30,6	214,2	
	HVO	84168	65651	0	2895	611	30,6	28,6	
	Mild elektrisk hybridisering	84622	66006	0	2911	612	30,6	28,8	
	10 % tomgangstid	84168	65651	0	2895	611	30,6	28,6	
	Elektrificering af gravemaskiner	53931	42066	179125	2500	611	34,0	37,5	
	Elektrificering alle maskiner	0	0	498617	1795	93	10,4	53,4	
Samlet	Basis (B0)	87696	73664	0	3145	658	32,8	232,8	
	HVO	91443	71326	0	3145	658	32,8	31,1	
	Mild elektrisk hybridisering	91435	71319	0	3145	656	32,8	31,1	
	10 % tomgangstid	90267	70408	0	3105	655	32,8	30,7	
	Elektrificering af gravemaskiner	59461	46379	189470	2727	655	36,4	40,5	
	Elektrificering alle maskiner	0	0	541720	1950	101	11,3	58,0	
%-ændring ift. Basis (B0)									
Lav last/tomgang	Basis (B0)	-	-	-	0	0	0	0	
	HVO	-	-	-	0	0	0	-87	
	Mild elektrisk hybridisering	-	-	-	-6	-5	0	-87	
	10 % tomgangstid	-	-	-	-16	-6	0	-89	
	Elektrificering af gravemaskiner	-	-	-	-9	-5	9	-84	
	Elektrificering alle maskiner	-	-	-	-38	-83	-60	-75	
Operation	Basis (B0)	-	-	-	0	0	0	0	
	HVO	-	-	-	0	0	0	-87	
	Mild elektrisk hybridisering	-	-	-	1	0	0	-87	
	10 % tomgangstid	-	-	-	0	0	0	-87	
	Elektrificering af gravemaskiner	-	-	-	-14	0	11	-82	
	Elektrificering alle maskiner	-	-	-	-38	-85	-66	-75	
Samlet	Basis (B0)	-	-	-	0	0	0	0	
	HVO	-	-	-	0	0	0	-87	
	Mild elektrisk hybridisering	-	-	-	0	0	0	-87	
	10 % tomgangstid	-	-	-	-1	0	0	-87	
	Elektrificering af gravemaskiner	-	-	-	-13	0	11	-83	
	Elektrificering alle maskiner	-	-	-	-38	-85	-66	-75	

Figur 1 viser de samlede resultater for energiforbrug (GJ) og NO_x-, PM- og CO₂ emissioner for alle scenarier.



Figur 1 Samlede resultater for energiforbrug (GJ) og NO_x, PM- og CO₂ emissioner for alle scenarier

I forhold til basisscenariet (B0) opnås de største reduktioner i energiforbruget og NO_x- og PM-emissionerne ved at elektrificere alle maskinerne på byggepladsen. Her beregnes besparelser i energiforbruget, NO_x- og PM-emissionerne på hhv. 38 %, 85 % og 66 % (Tabel 6 og Figur 1). De markante NO_x- og PM emissionsreduktioner skyldes i høj grad at emissionerne fra maskinerne med Stage IIIA emissionsniveauer elimineres ved et skifte til el. Der forventes yderligere NO_x - og PM-emissionsbesparelser ved fuld elektrificering i fremtiden, efterhånden som andelen af sol- og vindenergi stiger i det danske energisystem.

Det er vigtigt at understrege, at emissionerne ved fuld elektrificering sker på kraftværkerne der producerer strømmen, og at der derfor ingen emissionsudledninger sker på byggepladsen. Gevinsten for den lokale luftkvalitet mht. NO_x og PM reduktion bliver derfor maksimal (nulemission) ved fuld elektrificering af alle maskiner. Dette er vist på Figur 1 (yderst til højre) for NO_x, PM (og CO₂).

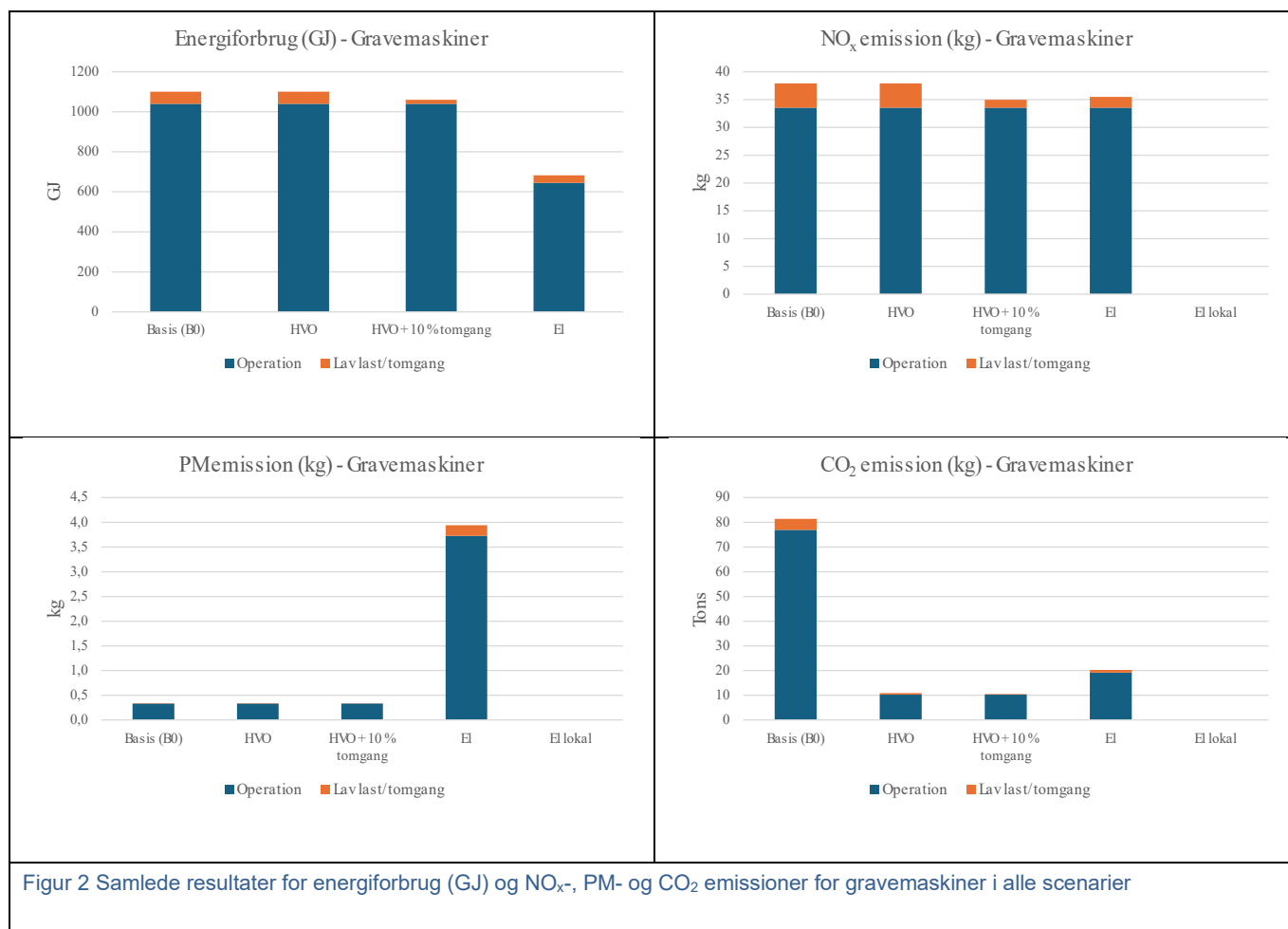
For CO₂ opnås de største emissionsbesparelser i HVO-, hybrid- og tomgang-scenarierne (87%, Tabel 6), hvor alle maskinerne som før nævnt bruger HVO. CO₂-emissionsbesparelsen i tomgang-scenariet er dog en anelse større end i de to andre scenarier, pga. den brændstofbesparelse der opnås ved at reducere tidsrummet, hvor gravemaskinerne står i tomgang (Tabel 6).

De beregnede CO₂-emissioner bliver i stigende grad højere for hhv. elgravemaskiner- og eldrift på alle maskiner-scenarierne, set i forhold til HVO scenariet. Dette skyldes at emissionsfaktorerne for elforbruget (Tabel 5) er omtrent tre gange større end emissionsfaktorerne for HVO (Tabel 4).

I scenariet med elgravemaskiner er PM-emissionerne 11 % højere end i basisscenariet. Årsagen til dette forklares nærmere i afsnit 3.2.

3.2 Gravemaskiner alle scenarier

Figur 2 viser de samlede resultater for energiforbrug (GJ) og NO_x-, PM- og CO₂ emissioner alene for gravemaskinerne i alle scenarier.



For gravemaskiner opnås samlet set en energibesparelse på 38 % og en CO₂ emissionsreduktion på 75 % ved at elektrificere maskinerne, set i forhold til basisscenariet.

Der beregnes blot en lille emissionsbesparelse for NO_x på 6 %, der skyldes det noget lavere energiforbrug i scenariet, da NO_x emissionsfaktoren for elforbruget samlet set er højere end for B0 (og HVO), fordi gravemaskinerne er udstyret med SCR-katalysatorer. Det gælder dog, at gravemaskinernes NO_x emissionsfaktorer for B0 (og HVO), set i forhold til emissionsfaktoren for elforbruget, er højere ved lav last/tomgang og lavere ved operationslast af motoren, pga. SCR-katalysatorernes forskellige renseeffektiviteter i de to motorbelastningsområder.

Omvendt bliver de beregnede PM emissioner mere end 11 gange højere ved elektrificering set i forhold til basisscenariet. Årsagen er, at PM-emissionsfaktorerne for elforbruget er meget store især pga. den relativt store mængde kul og biomasse der stadig anvendes på de kraftværker der producerer el. Det forventes at NO_x - og PM-emissionerne falder i fremtiden ved fuld elektrificering, efterhånden som andelen af sol- og vindenergi stiger i det danske energisystem.

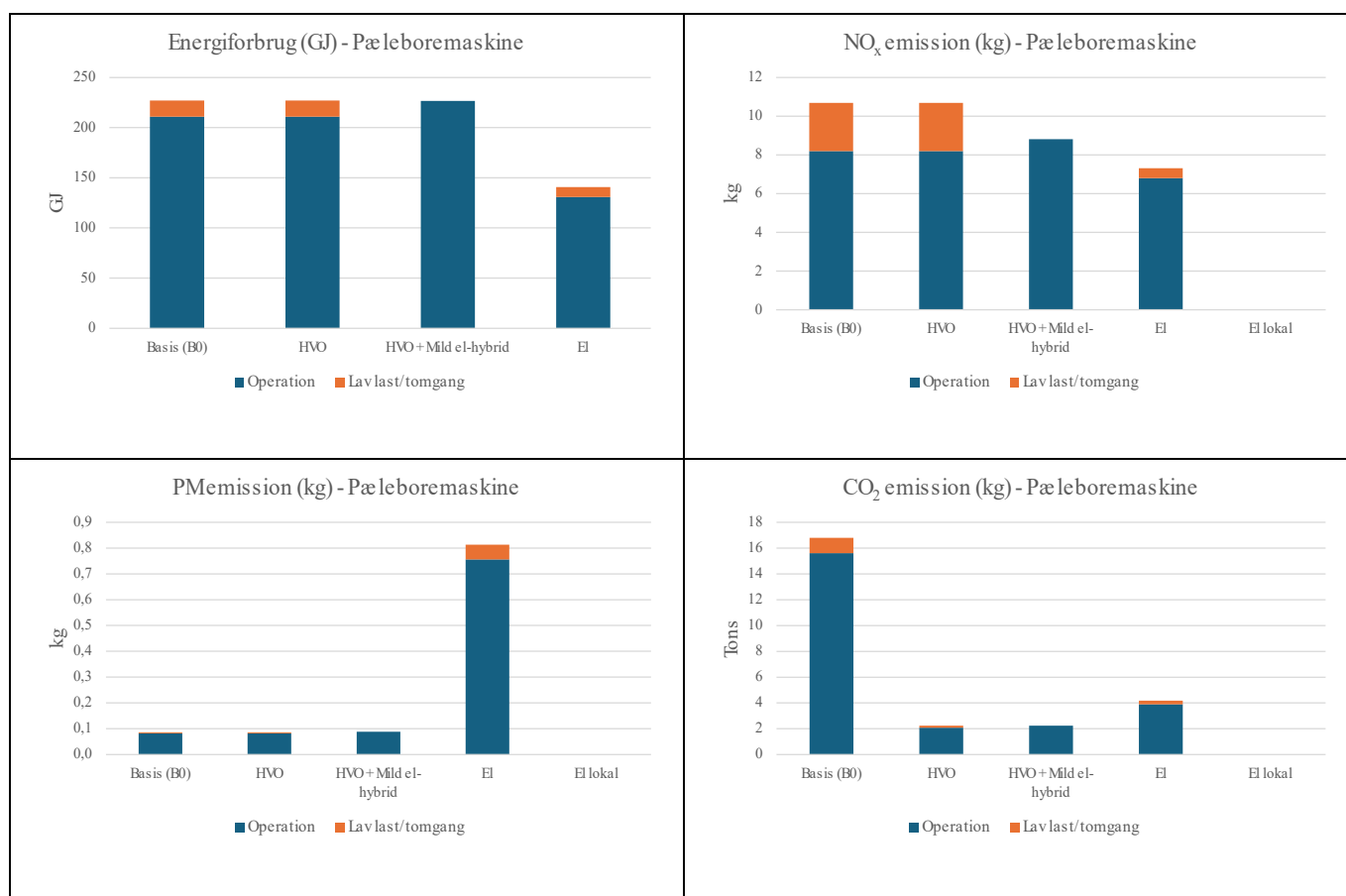
Som nævnt i afsnit 3.1 er det vigtigt at bemærke, at emissionerne ved elektrificering sker på kraftværker, der producerer strømmen, og at der altså ikke er emissionsudledninger på byggepladsen i dette scenarie.

Dette er vist på Figur 2 (yderst til højre) for NO_x, PM (og CO₂). Gevinsten for den lokale luftkvalitet mht. NO_x og PM reduktion bliver derfor maksimal i denne situation.

De største emissionsreduktioner opnås i tomgang-scenariet. Her bliver de beregnede NO_x-, PM- og CO₂-emissionsreduktioner hhv. 8 %, 1 % og 87 %, set i forhold til basisscenariet, og energiforbruget falder samlet set med 4 %. Faldet i NO_x emissionen er større end faldet i energiforbruget, fordi tidsrummet begrænses, hvor gravemaskinerne står i tomgang og har høje udledninger af NO_x.

3.3 Pæleboremaskine alle scenarier

Figur 3 viser de samlede resultater for energiforbrug (GJ) og NO_x-, PM- og CO₂ emissioner for pæleboremaskinen (Bauer BG 36V) i alle scenarier.



Figur 3 Samlede resultater for energiforbrug (GJ) og NO_x-, PM- og CO₂ emissioner for pæleboremaskine i alle scenarier

Set i forhold til basisscenariet opnås samlet set en energibesparelse på 38 %, og NO_x- og CO₂-emissionsreduktioner på hhv. 32 % og 75 % ved at elektrificere pæleboremaskinen.

For NO_x er den procentvise emissionsbesparelse mindre end den procentvise reduktion i energiforbruget, og for PM bliver de beregnede emissioner ved elektrificering mere end 9 gange højere end i basisscenariet. I begge tilfælde gælder de samme emissionsforklaringer, der er givet for gravemaskinerne i foregående afsnit 3.2.

Det skal igen bemærkes, at emissionerne ved elektrificering sker på kraftværkerne der producerer strømmen, og at der lokalt ikke er emissionsudledninger på byggepladsen. Dette er vist på Figur 2 (yderst til højre) for

NO_x, PM (og CO₂). Gevinsten for den lokale luftkvalitet på byggepladsen mht. NO_x og PM derfor bliver maksimal i denne situation.

I scenariet med mild elektrisk hybrid maskine bruger pæleboremaskinen HVO og genererer strøm i operationsfasen til brug for lav last/tomgangs-drift. I scenariet beregnes et uændret energiforbrug, mens NO_x- og CO₂-emissionerne falder med hhv. 18 % og 87 % og PM-emissionen stiger med knap 3 %, set i forhold til basisscenarioet.

Årsagen til at NO_x emissionerne falder i hybrid-scenarioet, er at dieselmotoren undgår at køre med lav last/tomgang, hvor røggastemperaturen er lav, og hvor SCR-katalysatoren derfor ikke er i stand til at rense udstødningsgassen for NO_x.

I Bilag 2 vises de afledte specifikke brændstofforbrug (kg/time og l/time) og emissionsfaktorer for NO_x og PM i g/time for de enkelte maskiner på byggepladsen, der bruges for B0 og HVO i projektet.

3. Konklusion

Samlet set for alle scenarier, opnås de største reduktioner i energiforbruget og NO_x- og PM-emissionerne ved at elektrificere alle maskinerne på byggepladsen. Her beregnes besparelser i energiforbruget, NO_x- og PM-emissionerne på hhv. 38 %, 85 % og 66 %, set i forhold til basisscenarioet hvor B0 benyttes. Ved elektrificering af alle maskiner sker alle udledninger på kraftværkerne og ikke på byggepladsen, og gevinsten for den lokale luftkvalitet mht. NO_x og PM reduktion bliver derfor maksimal (nulemission) i dette scenarie. For CO₂ opnås emissionsbesparelser på 87 % i HVO-, hybrid- og tomgang-scenarierne, hvor alle maskinerne bruger HVO.

For gravemaskiner alene opnås en samlet energibesparelse på 38 % og en CO₂ emissionsreduktion på 75 % ved at elektrificere maskinerne, set i forhold til basisscenarioet. Der beregnes blot en lille emissionsbesparelse på 6 % for NO_x, der skyldes det noget lavere energiforbrug i scenariet, da NO_x emissionsfaktoren for elforbruget samlet set er højere end for B0 (og HVO). De beregnede PM emissioner bliver mere end 11 gange højere ved elektrificering set i forhold til basisscenarioet, fordi kraftværkerne stadig anvender relativt store mængde kul og biomasse der giver anledning til høje PM emissioner. For gravemaskiner opnås de største emissionsreduktioner i tomgang-scenarioet. Her bliver de beregnede NO_x-, PM- og CO₂-emissionsreduktioner hhv. 8 %, 1 % og 87 %, set i forhold til basisscenarioet, og energiforbruget falder med 4 %.

For pæleboremaskinen alene opnås ved elektrificering en samlet energibesparelse på 38 %, og NO_x- og CO₂-emissionsreduktioner på hhv. 32 % og 75 %. Ved elektrificering bliver den beregnede procentvise emissionsbesparelse for NO_x mindre end den procentvise reduktion i energiforbruget, og for PM bliver de beregnede emissioner mere end 9 gange højere end i basisscenarioet, af samme årsag som nævnt for gravemaskiner. I mild-hybrid-scenarioet beregnes et uændret energiforbrug for pæleboremaskinen, mens NO_x- og CO₂-emissionerne falder med hhv. 18 % og 87 % og PM-emissionen stiger med knap 3 %, set i forhold til basisscenarioet.

Referencer

- CircleK (2024): Datablad for BioHVO100. Tilgængelig på: [Product Sheet.indd \(ecoonline.com\)](#).
- Energinet.dk (2024a): Miljødeklaration 2021. Tilgængelig på: [Miljødeklaration 2021 \(energinet.dk\)](#).
- Energinet.dk (2024b): Foreløbige gennemsnit af miljødeklarationer 2023. Tilgængelig på: [Foreløbige miljødeklarationer for 2023.pdf \(energinet.dk\)](#).
- Energinet.dk (2024c): Miljøredegørelse 2023. Årlig redegørelse for drivhusgasudledninger fra det danske elforbrug og elproduktion, 14 pp., Dok. 24/06730-1 Offentlig/Public – Juni 2024. Tilgængelig på: [Miljøredegørelse 2023 \(energinet.dk\)](#).
- Teknologisk Institut (2024): Leverance L.3.1. Fremtidens grønne byggeplads, dokumentationsrapport (projekt internt dokument under udarbejdelse).
- Winther, M. (2023): Energy consumption and emissions from non-road machinery in Denmark. Time series from 1980-2040. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 132 pp. Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy No. 578. Available at: <http://dce2.au.dk/pub/SR578.pdf>.

Bilag 1

Beregning af den nødvendige motoreffekt for pæleboremaskinen ved operationslast ved hybridisering

Tabel B.1.1 viser hvordan den nødvendige motoreffekt ved operationslast ved hybridisering ($P_{\text{operation, ved hybrid}}$) beregnes.

Først beregnes den nødvendige motoreffekt ved lav last ($P_{\text{lav-hybrid}} = 29,53 \text{ kW}$), i tidsrummet hvor maskinen arbejder ved lav last, for at kunne producere den nødvendige strøm til elmotoren ved hybridisering. Inputværdier for nominel motoreffekt (P_{nom}), CAN bus aflæst lastfaktor ved lav-last (LF_{lav}), og samlet effektivitet gennem generator (η_{gen}), inverter (η_{inv}), og batteri + elektrisk drivlinje ($(\eta_{\text{batteri + drivlinje}})$), frem til motorakslen ((η_{total})) bruges i beregningen.

Elektriciteten til batteriet genereres af dieselmotoren i operationsfasen, og ved at forholdsregne med tidsrum for lav-last og operation, kan den nødvendige stigning i motoreffekt ved operationslast til strømproduktion beregnes ($\Delta P_{\text{operation}} = 8,89 \text{ kW}$). Herefter findes den nødvendige motoreffekt ved operationslast ved hybridisering ($P_{\text{operation, ved hybrid}}$) som summen af motorlasten ved operationslast før hybridisering ($P_{\text{operation, før hybrid}}$) og den nødvendige stigning i motoreffekt ved operationslast til strømproduktion ($\Delta P_{\text{operation}}$).

Tabel B.1.1

Parameter	Enhed	Værdi
Effektivitet generator, η_{gen}		0,88
Effektivitet inverter, η_{inv}		0,95
Effektivitet, batteri + elektrisk drivlinje, $\eta_{\text{drivlinje}}$		0,9
Samlet effektivitet, $\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{gen}} \times \eta_{\text{inv}} \times \eta_{\text{drivlinje}}$		0,7524
Nominel effekt, dieselmotor, P_{nom}	kW	404
Motorlast ved lav last, LF_{lav}		0,055
Motoreffekt ved lav last, $P_{\text{lav}} = P_{\text{nom}} \times LF_{\text{lav}}$	kW	22,22
Nødvendig motoreffekt ved lav last, i lav-last-tidsrum, til strømproduktion, $P_{\text{lav-hybrid}} = P_{\text{lav}}/\eta_{\text{total}}$	kW	29,53
Tidsrum, lav last, ΔT_{lav}	timer	249,23
Tidsrum, operation, $\Delta T_{\text{operation}}$	timer	827,81
Nødvendig stigning i motoreffekt ved operationslast, i operationstidsrum, til strømproduktion, $\Delta P_{\text{operation}} = P_{\text{lav-hybrid}} \times \Delta T_{\text{lav}}/\Delta t_{\text{operation}}$	kW	8,89
Motoreffekt ved operationslast, før hybridisering, $P_{\text{operation, før hybrid}}$	kW	119,86
Motoreffekt ved operationslast, ved hybridisering, $P_{\text{operation, ved hybrid}} = P_{\text{operation, før hybrid}} + \Delta P_{\text{operation}}$	kW	128,75

Beregning af det specifikke brændstofforbrug for pæleboremaskinen ved lav last/tomgang og operationslast

Tabel B1.2 viser beregningen af det specifikke brændstofforbrug for pæleboremaskinen ved operation og lav last/tomgang.

Beregningerne bruger faktiske brændstofflowmålinger udført af TI (2024) på pæleboremaskinen Bauer BG 36V med HVO som brændstof, og tidsrum for lav last/tomgang og operation samt samlet brændstofforbrug for maskinen oplyst af Aarsleff A/S. Derudover bruges som input data CAN bus data for motorbelastningsprocent ved lav last/tomgang og anslået motorvirkningsgrad ved normal motorbelastning under operation.

Først beregnes den specifikke brændstofforbrug ved lav last ($\text{sfc}_{\text{lav}} = 373 \text{ g/kWh}$). Inputværdier for målt brændstofflow udført af TI (2024) på pæleboremaskinen (bf_{lav}), nominel motoreffekt (P_{nom}) og lastfaktor ved lav-last (LF_{lav}) bruges i beregningen.

Derefter beregnes det samlede brændstofforbrug ved operation ($\text{BF}_{\text{operation}}$) som forskellen mellem det totale brændstofforbrug (BF_{total}) oplyst af Aarsleff A/S og det beregnede samlede brændstofforbrug for lav last/tomgang (BF_{lav}). Brændstofflowet ved operation ($\text{bf}_{\text{operation}}$) kan herefter findes som det samlede brændstofforbrug ved operation ($\text{BF}_{\text{operation}}$) delt med tidsrummet for operation ($\Delta T_{\text{operation}}/3,6$), og energiflowet ved operation ($\text{ef}_{\text{operation}}$) kan findes ved at benytte brændværdien for HVO i en omregning af brændstofflowet ved operation.

Motoreffekten ved operation findes som produktet af energiflowet ved operation ($\text{ef}_{\text{operation}}$) og motorens anslåede virkningsgrad (η_{motor}). Herefter kan det specifikke brændstofforbrug ved operation ($\text{sfc}_{\text{operation}} = 233 \text{ g/kWh}$), beregnes som det specifikke brændstofflow ved operation ($\text{bf}_{\text{operation}}$) x 3600 delt med motoreffekten ved operation ($P_{\text{operation}}$).

Tabel B.1.2

Parameter	Enhed	Værdi
Brændstofflow ved lav last, bf_{lav} (målt)	g/s	2,3
Motorlast ved lav last, LF_{lav}		0,055
Nominel effekt, dieselmotor, P_{nom}	kW	404
Motoreffekt ved lav last, $P_{\text{lav}} = P_{\text{nom}} \times \text{LF}_{\text{lav}}$	kW	22,22
Specifikt brændstofforbrug ved lav last, $\text{sfc}_{\text{lav}} = \text{bf}_{\text{lav}}/P_{\text{lav}} \times 3600$	g/kWh	373
Tidsrum, lav last, ΔT_{lav}	Timer	43,64
Samlet brændstofforbrug ved lav last, $\text{BF}_{\text{lav}} = \text{bf}_{\text{lav}} \times \Delta T_{\text{lav}} \times 3,6$	kg	361
Samlet brændstofforbrug, BF_{total}	kg	5145
Samlet brændstofforbrug ved operation, $\text{BF}_{\text{operation}} = \text{BF}_{\text{total}} - \text{BF}_{\text{lav}}$	kg	4784
Tidsrum, operation, $\Delta T_{\text{operation}}$	Timer	171,11
Brændstofflow ved operation, $\text{bf}_{\text{operation}} = \text{BF}_{\text{operation}}/\Delta T_{\text{operation}}/3,6$	g/s	7,77
	l/time	35,84
Energiflow ved operation, $\text{ef}_{\text{operation}} = \text{bf}_{\text{operation}} \times \text{LHV}_{\text{HVO}}$	kJ/s = kW	342,46
Motorvirkningsgrad, η_{motor}		0,35
Motoreffekt ved operation, $P_{\text{operation}} = \text{ef}_{\text{operation}} \times \eta_{\text{motor}}$	kW	119,86
Specifikt brændstofforbrug ved operation, $\text{sfc}_{\text{operation}} = \text{bf}_{\text{operation}}/P_{\text{operation}} \times 3600$	g/kWh	233

Beregning af det specifikke brændstofforbrug for gravemaskinerne ved lav last/tomgang

Tabel B1.3 viser beregningen af det specifikke brændstofforbrug for gravemaskinerne ved lav last/tomgang.

Beregningerne bruger faktiske brændstofflowmålinger udført af TI (2024) på gravemaskinen CAT325F L med B0 som brændstof, nominel motoreffekt (P_{nom}) og aflæste CAN bus data for motorbelastningsprocenten ved lav last/tomgang.

Først beregnes motoreffekten ved lavlast (P_{lav}), og energiflowet ved lav last (ef_{lav}) findes ved at benytte brændværdien for B0 i en omregning af brændstofflowet ved lav last (bf_{lav}).

Herefter kan det specifikke brændstofforbrug ved lav last ($sfc_{lav} = 801$ g/kWh), beregnes som det specifikke brændstofflow ved lav last (bf_{lav}) x 3600 delt med motoreffekten ved lav last (P_{lav}).

Det specifikke brændstofforbrug ved operation ($sfc_{operation} = 281$ g/kWh) er målt af TI (2024).

Tabel B.1.3

Parameter	Enhed	Værdi
brændstofflow ved lav last, bf_{lav} (målt)	g/s	0,70
Møtorlast ved lav last, LF_{lav}		0,0258
Nominel effekt, dieselmotor, P_{nom}	kW	122
Møtoeffekt ved lav last, $P_{lav} = P_{nom} \times LF_{lav}$	kW	3,1476
Energiflow ved lav last, $ef_{lav} = bf_{lav} \times LHV_{B0}$	kJ/s	29,9
Specifikt brændstofforbrug ved lav last, $sfc_{lav} = bf_{lav}/P_{lav} \times 3600$	g/kWh	801
Specifikt brændstofforbrug ved operation, $sfc_{operation}$ (målt)	g/kWh	281

Bilag 2

Tabel B.2.1 viser de afledte specifikke brændstofforbrug (kg/time og l/time) og emissionsfaktorer for NO_x og PM i g/time for de enkelte maskiner på byggepladsen, der bruges for B0 og HVO i projektet.

Tabel B.2.1 Afledte specifikke brændstofforbrug (kg/time og l/time) og emissionsfaktorer for NO _x og PM i g/time der beregnes for B0 og HVO for arbejdsmaskinerne på byggepladsen											
Scenarie	Maskintype	Model	Brændstofforbrug		Brændstofforbrug		NO _x emissionsfaktor		PM emissionsfaktor		
			Operati on	Lav last/ tomgang	Operati on	Lav last/ tomgang	Operati on	Lav last/ tomgang	Operati on	Lav last/ tomgang	
			kg/time	kg/time	l/time	l/time	g/time	g/time	g/time	g/time	
Basis (B0)	Pæleboremaskine	Bauer BG 36V	28,9	8,6	34,4	10,2	47,9	57,0	0,48	0,09	
	Pæleboremaskine	Bauer BG 55V	43,5	11,9	51,8	14,2	584,8	121,4	18,05	7,34	
	Gravemaskine	CAT 325F L	15,6	2,6	18,6	3,1	21,5	8,1	0,22	0,01	
	Gravemaskine	CAT 335FL CR	18,3	3,2	21,7	3,8	25,2	9,9	0,25	0,02	
	Gravemaskine	Hitachi ZX135US-6	10,0	1,6	11,9	1,9	13,7	5,0	0,14	0,01	
	Gravemaskine	Hitachi ZX135US-6	9,9	1,6	11,8	1,9	13,6	5,0	0,14	0,01	
	Gravemaskine (lang arm)	Volvo EC300 ELR	11,7	3,4	13,9	4,0	16,1	10,5	0,16	0,02	
	Ankerboremaskine	Hütte 609 Klemm KR 806- 3G	4,9	1,9	5,9	2,2	66,5	19,2	2,05	1,16	
	Ankerboremaskine	3G	3,9	1,6	4,7	1,9	6,5	10,6	0,28	0,07	
HVO	Pæleboremaskine	Bauer BG 36V	28,0	8,3	35,8	10,6	47,9	57,0	0,48	0,09	
	Pæleboremaskine	Bauer BG 55V	42,1	11,5	54,0	14,8	584,8	121,4	18,05	7,34	
	Gravemaskine	CAT 325F L	15,1	2,5	19,4	3,2	21,5	8,1	0,22	0,01	
	Gravemaskine	CAT 335FL CR	17,7	3,1	22,7	3,9	25,2	9,9	0,25	0,02	
	Gravemaskine	Hitachi ZX135US-6	9,7	1,5	12,4	2,0	13,7	5,0	0,14	0,01	
	Gravemaskine	Hitachi ZX135US-6	9,6	1,5	12,3	2,0	13,6	5,0	0,14	0,01	
	Gravemaskine (lang arm)	Volvo EC300 ELR	11,3	3,3	14,5	4,2	16,1	10,5	0,16	0,02	
	Ankerboremaskine	Hütte 609 Klemm KR 806- 3G	4,8	1,8	6,1	2,3	66,5	19,2	2,05	1,16	
	Ankerboremaskine	3G	3,8	1,5	4,9	2,0	6,5	10,6	0,28	0,07	