

De Bouwplaats van Morgen

Resultaten monitoring elektrische graafmachines

Auteurs:

- Michiel Zult
- René van Gijlswijk
- Peter van der Mark

11-10-2024



COLOFON

- Project: DKTl Bouwplaats van Morgen
- DKTl: Demonstratieproject Klimaattechnologie en Innovatie
- Projectnummer TNO: 060.45875
- Rapportnummer: TNO 2024 P11947
- Opdrachtgever: IenW/RVO
- Datum: 11 oktober 2024
- Aantal pagina's: 30
- Auteurs: René van Gijlswijk, Michiel Zult, Peter van der Mark

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

@2024 TNO

Het auteursrecht van deze TNO deliverable bevindt zich bij TNO.

Inhoudsopgave

1. Inleiding
2. Opzet monitoring
3. Monitoring resultaten
 - a) Dagelijkse inzet en energieverbruik
 - b) Use cases
 - c) Vergelijkende meting diesel-elektrisch
4. Rekenmodel diesel-elektrisch
 - a) Opzet rekenmodel
 - b) Resultaten verschillende use cases: energieverbruik en besparing emissies
5. Conclusies en aanbevelingen

Appendices

- A. Bepalen ketenemissies energiedragers

1. Inleiding

Inleiding

Achtergrond en doel

Dit TNO rapport is één van de resultaten van het DKTi project 'Bouwplaats van Morgen'. Het project is in nauwe samenwerking uitgevoerd door een consortium van 7 aannemers, 2 kennisinstellingen (TNO en FIER) en de leverancier van o.a. elektrische grondverzetmachines (Staad). Vanwege de nationale klimaatdoelen én de stikstofproblematiek, is verduurzaming van de bouwsector gewenst. Elektrificatie van mobiele machines kan een bijdrage leveren aan vermindering van de uitstoot van CO₂, stikstofoxiden (NO_x) en fijnstof. In dit project zijn 7 batterij-elektrische grondverzetmachines door Staad geleverd en door de aannemers binnen het consortium ingezet bij uitvoering van hun werkzaamheden. Doel van het project was om vanuit praktijkervaringen met deze machines te komen tot nieuwe inzichten en kennis over inzetbaarheid, energieverbruik, emissiebesparing, kosten en logistieke vraagstukken omtrent bijvoorbeeld het opladen van de accu's van deze machines. Dit TNO rapport is met name gericht op de inzetbaarheid, het energieverbruik en de emissiebesparing waarbij ook de prestaties bij verschillende typen werkzaamheden (use cases) tegen het licht zijn gehouden.

Aanpak

Zeven batterij-elektrische grondverzetmachines zijn gemonitord in de praktijk, specifiek gaat het om zes 17-ton mobiele graafmachines (DX165W-Electric, figuur 1) en één 35-ton rupsgraafmachine (DX355LC-Electric, figuur 2). De specificaties omtrent vermogen en accucapaciteit staan in tabel 1. Praktijkdata is verzameld over de inzet (bijv. het aantal draaiuren) en het energieverbruik. De verkregen data is aangevuld met input van de aannemers, waarmee inzicht is verkregen in inzetbaarheid en energieverbruik bij verschillende use cases. Verder is onderzocht hoe het energieverbruik en de emissies van een diesel machine zich verhouden tot die van een elektrische variant. Dit is gedaan met vergelijkende metingen, waarbij vergelijkbare elektrische en diesel machines eenzelfde reeks aan typische grondverzet activiteiten hebben uitgevoerd (en waarbij tegelijkertijd de emissies en het energieverbruik zijn gemeten). De resultaten van deze metingen zijn gebruikt om een model te ontwikkelen, dat inzicht biedt in operationele inzetbaarheid, energieverbruik en emissiebesparingen van elektrische machines t.o.v. standaard diesel machines.

Tabel 1: Specificaties van de twee type graafmachines die gemonitord zijn in het project

Machine	Nominaal vermogen	Accucapaciteit
DX165W-Electric 17-ton mobiele graafmachine	110 kW	2 x 140 kWh (2 x 114 kWh netto) 1 x 400 kWh (1 x 385 kWh netto)*
DX355LC-Electric 35-ton rupsgraafmachine	200 kW	2 x 400 kWh (2 x 385 kWh netto)

* Gedurende het project heeft de DX165W de optie gekregen om met een 400 kWh accu uitgerust te worden i.p.v. twee kleinere accu's



Figuur 1: 17-ton mobiele graafmachine (DX165W).



Figuur 2: 35-ton rupsgraafmachine (DX355LC).

2. Opzet monitoring

Opzet monitoring (1)

Het doel van de monitoring was het verkrijgen van inzicht in inzetbaarheid en energieverbruik van de elektrische graafmachines en de emissiebesparingen ten opzichte van conventionele diesel graafmachines. Hiertoe is op drie manieren data ingewonnen:

- ❖ 1) Monitoren dagelijkse inzet (cloudmodule data) met motordata (a) en accudata* (b)

Iedere machine en individuele accu is uitgerust met een cloudmodule (met een stukje software), die een simkaart bevat en data van de machine uitleest. De cloudmodule verstuurt de data, die geaggregeerd is over een minuut, naar een server van Staat, waarvandaan TNO vervolgens de relevante data kon opslaan op een eigen server. Relevante data hierin is bijvoorbeeld vermogensdata van de motor/accu of de state of charge (SOC) data van de accu.

1a) motordata (van de machine)

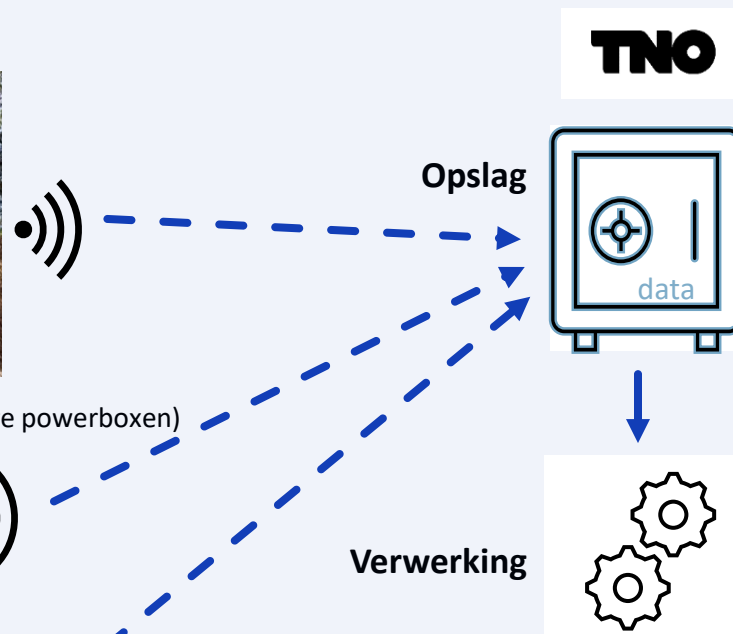
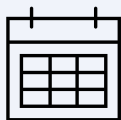


1b) accudata (van de verwisselbare powerboxen)



2) Planning

(type werkzaamheden)



- ❖ 2) Koppeling met planning van de aannemers

De aannemers stuurden regelmatig input (tweemaandelijks) naar TNO over de inzet-planning van de machines en de type werkzaamheden waarop deze werden ingezet. Deze informatie is vervolgens door TNO gekoppeld aan de ingewonnen cloudmodule data, zodat inzicht kon worden verkregen in de prestaties bij verschillende use cases. Ook kon zo de cloudmoduledata worden geverifieerd met de verkregen informatie uit de inzet-planning.

In de planning kon bijvoorbeeld worden aangegeven wanneer de machine werd ingezet en op wat voor use case, maar ook of de machine buiten gebruik was door vakantie of een storing.

- ❖ 3) Vergelijkende meting tussen diesel en elektrisch

Op 8 en 9 mei 2023 zijn twee dagen lang vergelijkende metingen gedaan tussen elektrische- en diesel graafmachines op het terrein van het SOMA college te Harderwijk. Op de eerste dag werd de DX355LC vergeleken met een vergelijkbare dieselvariant en op de tweede dag werd dit gedaan voor de DX165W. Bij beide metingen voerden de machines eenzelfde set aan typische activiteiten uit, waarbij het energieverbruik van de elektrische- en dieselmachine en de NO_x- en fijnstofemissies van de dieselmachine werden gemeten. De resultaten van deze metingen zijn gebruikt om een model te ontwikkelen welke inzicht biedt in operationele inzetbaarheid, energieverbruik en emissiebesparingen van elektrische machines t.o.v. standaard dieselmachines.

* In de praktijk is de accudata van onvoldoende kwaliteit gebleken om te gebruiken ter onderbouwing van de analyses. De oorzaak hiervan is dat het al dan niet versturen van de accudata afhankelijk is geweest van de aanwezigheid van een GSM-verbinding (de data werd niet eerst lokaal opgeslagen en verstuurd op het moment dat er verbinding was). Doordat de cloudmodules zijn gemonteerd in de behuizing van de powerbox en een andere oplossing niet op termijn haalbaar was, was de verbinding zeer regelmatig slecht en werd er geen data verstuurd.

Opzet monitoring (2)

KPI's

Bij de verschillende machines en use cases is gekeken naar de volgende kritieke prestatie indicatoren (KPI's) die voorafgaand aan de monitoring zijn vastgelegd:

- Aantal werkdagen* ingezet
- Gemiddeld aantal draaiuren ingezet per werkdag
- Gemiddeld energieverbruik per draaiuur
- Gemiddeld energieverbruik per werkdag
- Geschatte diesel besparing
- Aandeel idling in tijd en in verbruik
- Aantal draaiuren per accuwissel
- Gemiddeld aantal accuwissels
- Verdeling AC/DC laden

* Een werkdag is minimaal 1,5 draaiuren en 45 kWh energieverbruik (70 kWh bij de rupsgraafmachine).

Delen van monitoringresultaten met projectpartners

Iedere twee maanden is door TNO een rapportage gemaakt en gedeeld met de partners met daarin de tussentijdse KPI resultaten verkregen uit de data van de twee voorgaande maanden (zie voorbeeld figuur 3). Het doel hiervan was tweedelig: de aannemers verkregen inzicht in de prestaties van hun elektrische graafmachines en TNO kon daarover feedback ontvangen vanuit de aannemers. Daarnaast was er tenminste vier keer per jaar een bijeenkomst met alle consortiumpartners waarbij TNO de laatste inzichten vanuit de data presenteerde en de aannemers onderling informatie deelden over waar men in de praktijk tegenaan liep bij de inzet van de machines. Zo werd verdere context verkregen over de ingewonnen data, vond kennisdeling plaats en ontstonden ideeën voor verdere verbeteringen.

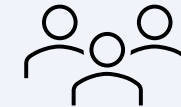
Rapportage

6x per jaar



Periodiek overlegmoment met de partners

4x per jaar



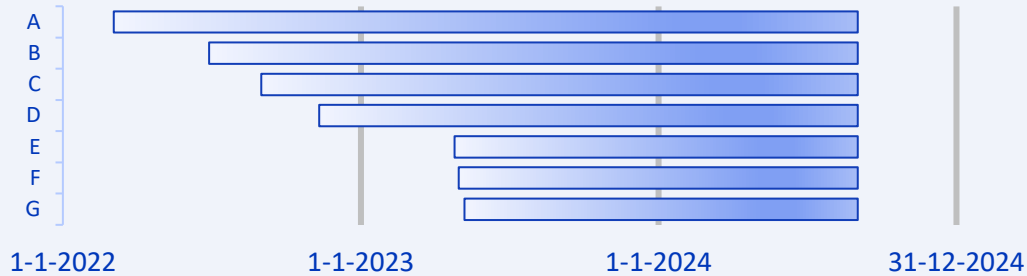
Type machine	E-DX165W-5A	E-DX165W-5A	E-DX165W-5A	E-DX165W-5A	E-DX165W-5A	E-DX165W-5A	E-DX300LC-7B
Draaidagen	26	35	43	41	36	35	36
Draaiuren	188	269	376	320	264	277	312
Draaiuren/werkdag	7.2	7.7	8.7	7.8	7.3	7.9	8.7
kWh/draaiuur	29.6	27.1	21.6	24.2	19.6	26.9	50.2

Figuur 3: Snapshot van een deel van een tweemaandelijks rapportage.

3. Resultaten monitoring

Resultaten monitoring: dagelijkse inzet

De machines zijn gedurende het project geleidelijk door Staad uitgeleverd (zie figuur 4). In totaal zijn ongeveer 12,5 inzetjaren aan data verzameld en geanalyseerd.



Figuur 4: Inzetperiode van de machines bij de verschillende aannemers (A t/m G).

De machines zijn gezamenlijk in totaal ruim 2300 werkdagen ingezet. In tabel 2 staan de gemiddelde prestaties van beide typen machines vermeld. Beide typen machines zijn gemiddeld ongeveer 8 uur per werkdag ingezet. Figuren 5 en 6 laten per machinetype de verdeling van motorbelasting zien waarmee gedraaid is, gebaseerd op vermogenswaarden geaggregeerd over een minuut.

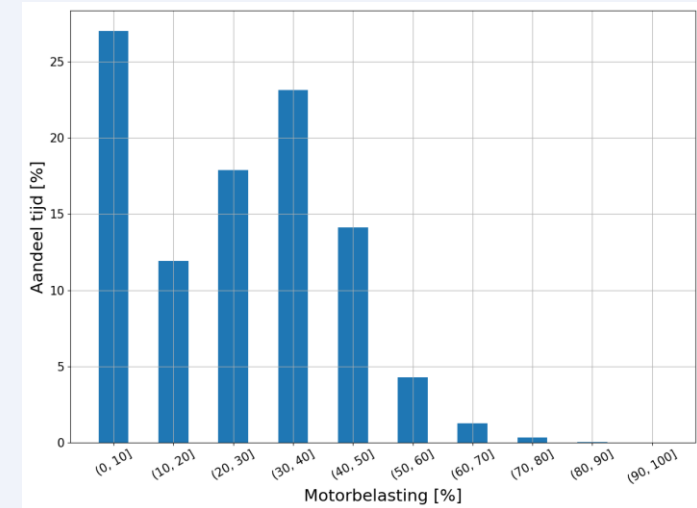
Tabel 2: Gemiddelde resultaten¹ van KPI's over de gehele monitoringsperiode²

	DX165W	DX355LC
Gemiddeld vermogen / motorbelasting	27,8 kW / 25%	52,1 kW / 26%
Gemiddeld aantal draaiuren per werkdag	8,0	7,9
Gemiddeld verbruik ³ per werkdag	222 kWh	409 kWh
Gemiddeld aantal werkdagen per jaar	216	197
Gemiddeld aantal draaiuren per jaar	1728	1548
Gemiddeld verbruik ³ per jaar	48.000 kWh	80.600 kWh
Aandeel idling (tijd)	30%	29%
Aandeel idling (verbruik)	6,2%	5,6%

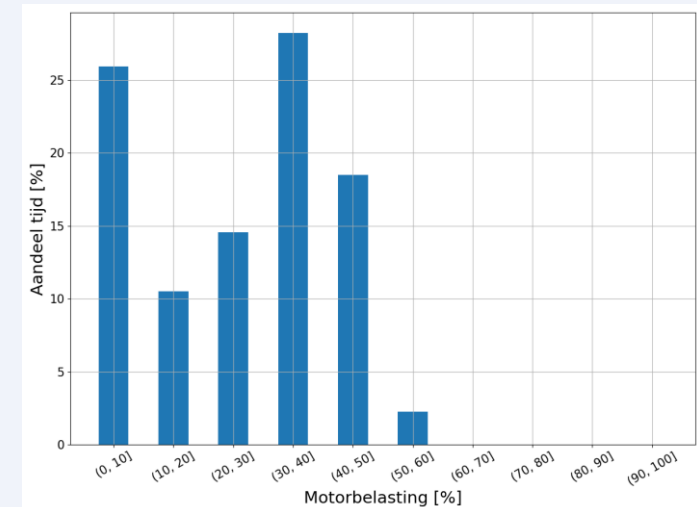
¹ Bij het bepalen van de gemiddelde resultaten tellen de resultaten per aannemer even zwaar mee. Zo heeft een machine die vroeg is opgeleverd (en dus veel is ingezet) evenveel invloed op het gemiddelde als een machine die pas later is opgeleverd.

² Monitoringsperiode einddatum is 1 juli 2024.

³ O.b.v. vermogensdata gemeten op de machine (opgenomen vermogen motor). Laadverliezen zijn hierbij niet meegenomen. Motorbelasting is het opgenomen vermogen gedeeld door het nominaal vermogen van de motor.



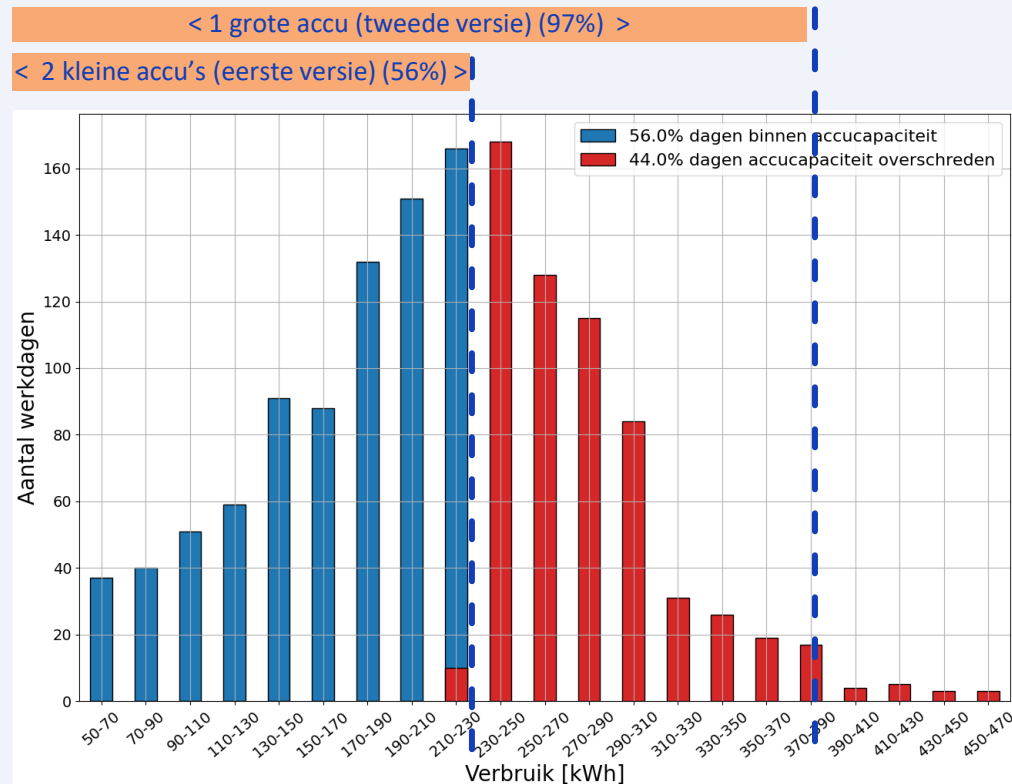
Figuur 5: Motorbelasting verdeling DX165W (o.b.v. minuutgemiddelde vermogensdata).



Figuur 6: Motorbelasting verdeling DX355LC (o.b.v. minuutgemiddelde vermogensdata).

Resultaten monitoring: verbruik per werkdag (1)

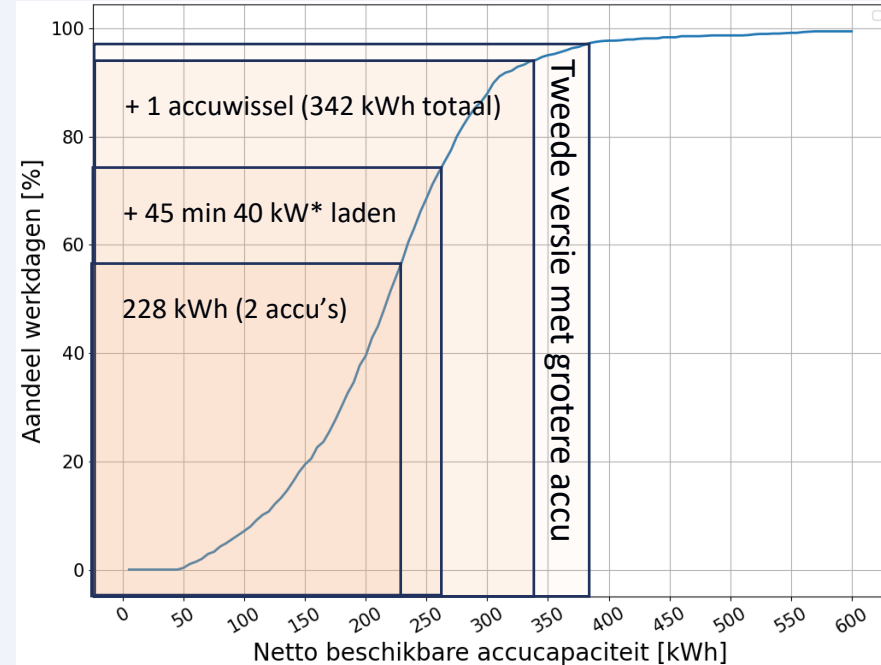
Het energieverbruik per werkdag is gemonitord, omdat het inzicht biedt in de spreiding van de energievraag over de verschillende werkdagen, daar waar de gemiddelde waarde dat niet doet. Daarnaast kan hiermee een inschatting gemaakt worden voor welk aandeel van de werkdagen de accu-capaciteit voldoende is geweest (zonder bij te hoeven laden of een accuwissel te plegen), aangezien het verbruik hier is berekend met het opgenomen vermogen van de motor.



Figuur 7: Energieverbruik per werkdag* verdeling van de DX165W, waarbij staat aangegeven voor hoeveel procent van de werkdagen de capaciteit van 2 kleine accu's of 1 grote accu voldoende is.

DX165W: twee kleine accu's vs een grote accu:

Aanvankelijk beschikte de DX165W over twee kleine accu's (+1 kleine wisselaccu) van elk 140 kWh (114 kWh netto). Gedurende het project kwam er als optie bij om in plaats daarvan een grote accu in te zetten van 400 kWh (385 kWh netto). Figuur 7 laat de energieverbruik per werkdag verdeling zien van alle DX165W machines. Aangenomen dat iedere dag wordt aangevuld met volledige accu-capaciteit, is in de figuur aangegeven voor hoeveel procent van de werkdagen de capaciteit van twee kleine accu's of een grote accu voldoende zou zijn. Figuur 8 laat zien hoe deze dekking vergroot kan worden wanneer er een bijlaadsessie plaatsvindt van 45 min op 40 kW** of wanneer er een accuwissel wordt gepleegd. De variant met 2 kleine accu's plus 1 accuwissel doet weinig onder voor de variant met de grote accu (385 kWh netto).



Figuur 8: Voor vier verschillende configuraties met bijbehorende accu-capaciteit staat aangegeven voor hoeveel procent van de werkdagen de capaciteit voldoende is.

* Een werkdag is minimaal 1,5 draaiuren en 45 kWh energieverbruik (70 kWh bij de rupsgraafmachine).

** De aannemers beschikken over een mobiele 40 kW DC lader, die past op een 3x63A bouwaansluiting.

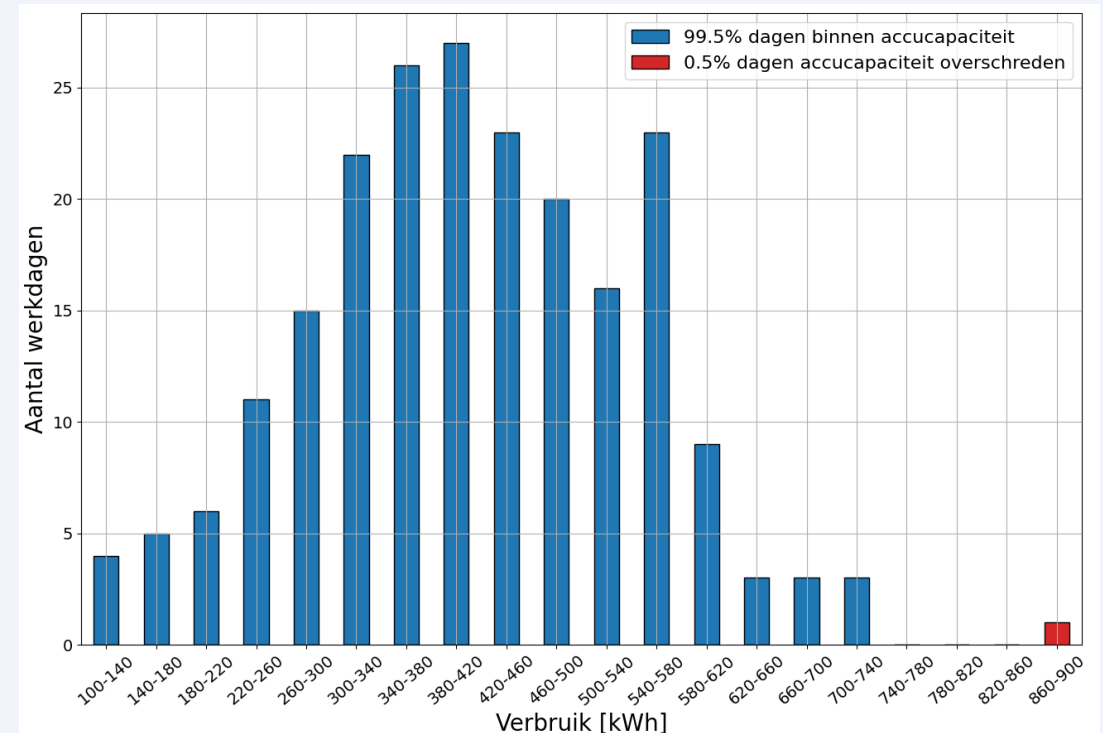
Resultaten monitoring: verbruik per werkdag (2)

DX355LC: 35 ton rupsgraafmachine

De DX355LC beschikt over twee grote accu's van 400 kWh (385 kWh netto). Figuur 9 laat zien dat de accucapaciteit voor bijna alle werkdagen van de DX355LC toereikend is geweest. Belangrijke kanttekening hierbij is wel dat deze figuur is opgetekend onder de aanname dat iedere werkdag wordt aangevangen met twee volle accu's. Voor dit type machine zal dat niet altijd zo zijn, wat meerdere redenen heeft:

- Deze machine is soms in staat om twee werkdagen op rij te draaien zonder tussentijds bij te laden.
- De rupsgraafmachine kan niet zoals de mobiele graafmachine eenvoudig naar een laadpunt rijden.
- Het opladen van de accu's duurt lang in vergelijking met de mobiele graafmachine. Als er met 2 x 22 kW AC wordt geladen, duurt het ruim 20 uur voordat de accu's weer vol zitten (wanneer ze helemaal leeg zijn).

Conclusie: de (verwisselbare) accucapaciteit van 2x400kWh is voor 99,5% van de werkdagen voldoende.



Figuur 9: Energieverbruik per werkdag* verdeling van de DX355LC. In de legenda staat aangegeven voor welk percentage van de werkdagen de totale accucapaciteit voldoende was.

* Een werkdag is minimaal 1,5 draaiuren en 45 kWh energieverbruik (70 kWh bij de rupsgraafmachine).

Resultaten monitoring: laadtijden

Berekening laadtijd

De verwachte laadtijd kan als volgt worden ingeschat:

AC-lader: $\text{laadtijd} = (\text{netto capaciteit} / 0.85 / \text{laadstroom}) * (\text{eindpercentage} - \text{beginpercentage})$

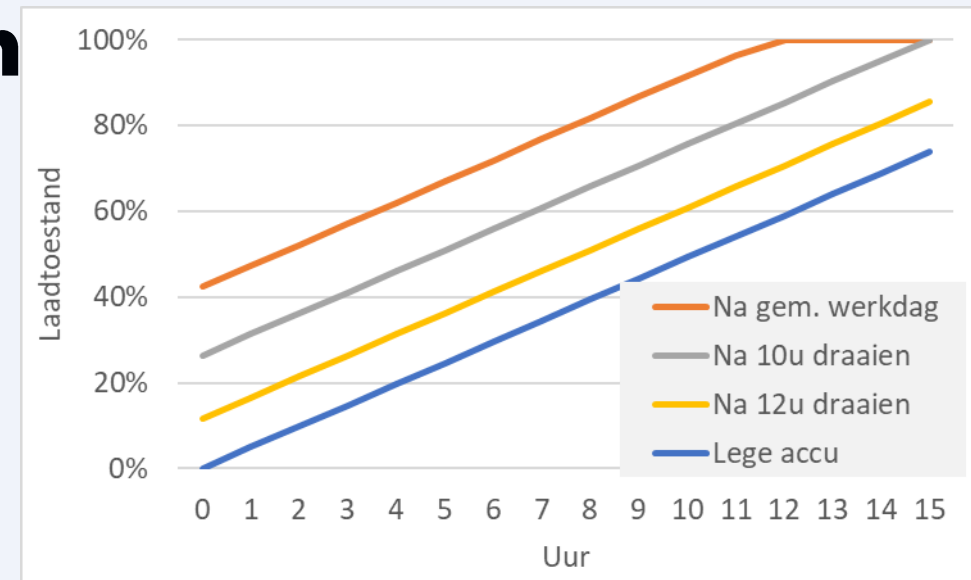
DC-lader: $\text{laadtijd} = (\text{netto capaciteit} / \text{laadstroom}) * (\text{eindpercentage} - \text{beginpercentage})$

Het laatste deel van de formule hoeft alleen te worden gebruikt als de accu niet volledig leeg was.

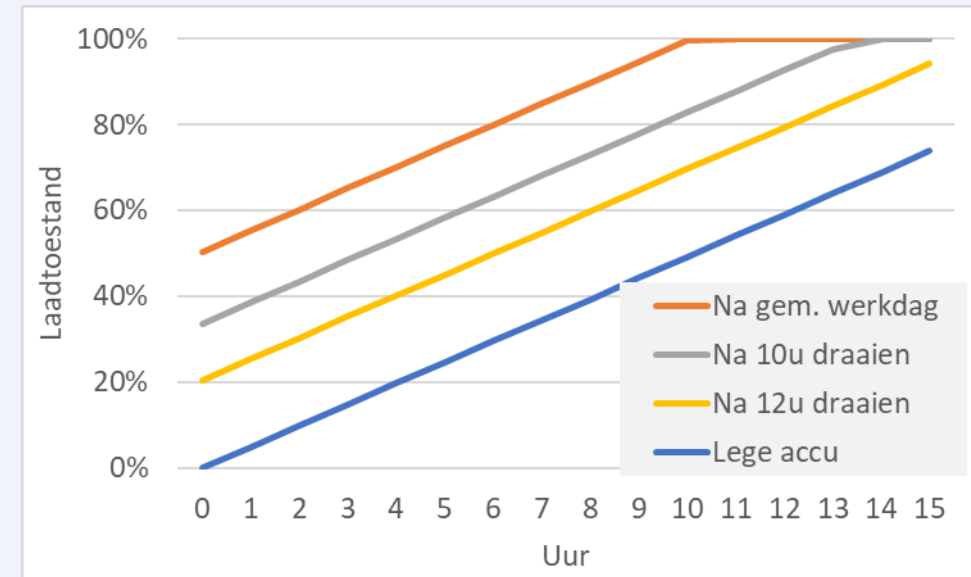
De laadtijd van ruim 20 uur (vorige pagina) voor de DX355LC is als volgt:

$\text{laadtijd} = (2 * 385) / 0.85 / (2 * 22) = 20,6$ uur.

In figuur 10 en 11 is te zien hoe de laadtijd verandert bij een langere draaitijd.



Figuur 10: Laadtijd DX165W bij 1x22 kW AC

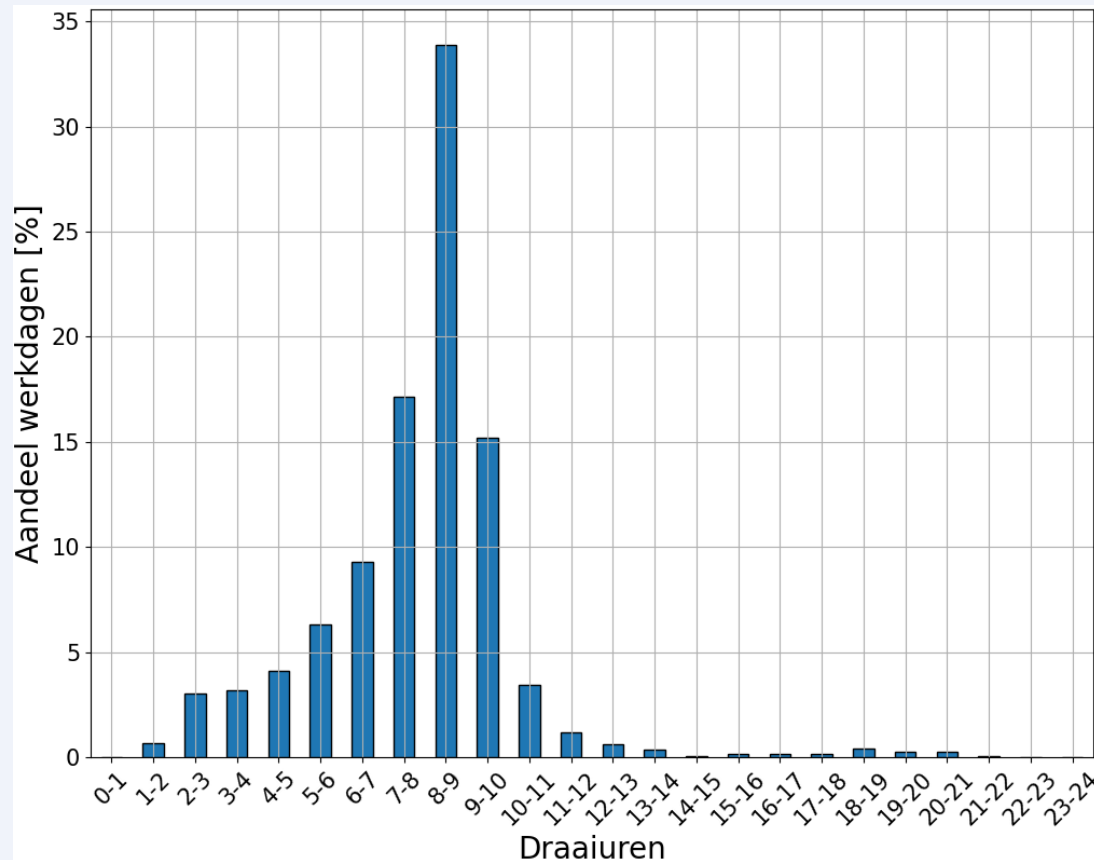


Figuur 11: Laadtijd DX355LC bij 2x22 kW AC

Resultaten monitoring: draaiuren per werkdag (1)

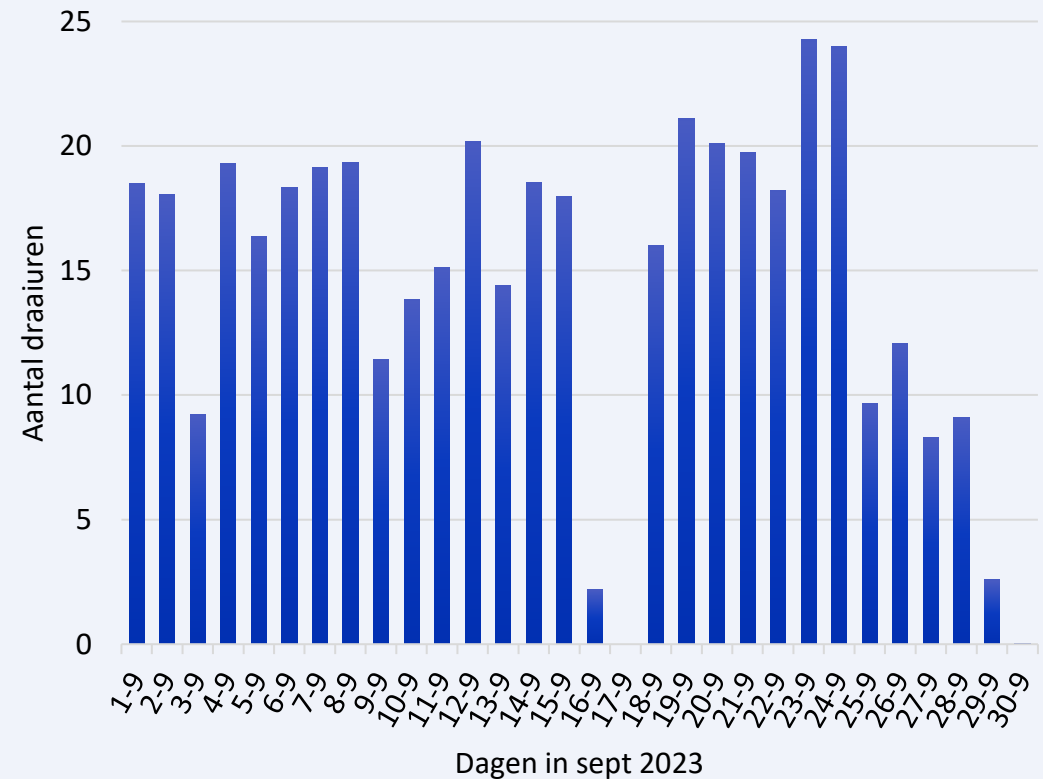
DX165W

Figuur 12 laat de verdeling zien van het aantal draaiuren per werkdag. Het vaakst wordt er tussen de 8 en 9 uur gedraaid en op 66% van de werkdagen tussen 7 en 10 uur. Er komen ook een aantal opvallende outliers van boven de 14 uur voor. Zo is een aannemer in staat gebleken om 5 dagen op rij minimaal 18 uur te draaien, waarvan twee dagen op rij zelfs 24 uur (zie figuur 13). Dat is gedaan met twee kleine accu's en een kleine wisselaccu. Met een goede planning kunnen dus zeer lange dagen gedraaid worden, waarbij dat zelfs opeenvolgende dagen kunnen zijn.



Figuur 12: Draaiuren per werkdag verdeling DX165W over de gehele monitoringsperiode

Conclusie: Intensieve inzet van meer dan 18 uur per dag is mogelijk met drie (verwisselbare) accu's van 114 kWh netto.

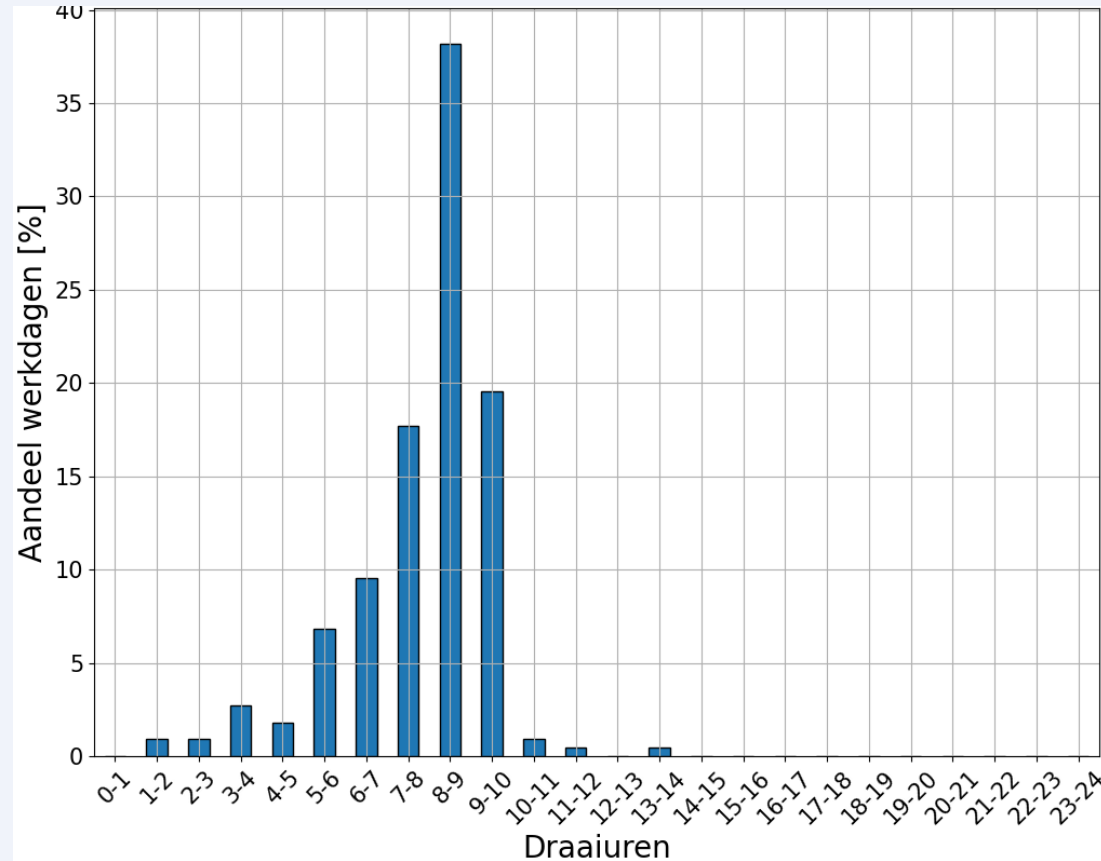


Figuur 13: Draaiuren per werkdag overzicht van een aannemer gedurende een maand, waarbij zeer lange dagen zijn gemaakt.

Resultaten monitoring: draaiuren per werkdag (2)

DX355LC

Bij de rupsgraafmachine zijn er geen opvallende outliers waargenomen in het aantal draaiuren per werkdag (zie figuur 14). Op ongeveer 75% van de werkdagen is er tussen de 7 en 10 uur gedraaid.



Figuur 14: Draaiuren per werkdag verdeling DX355LC over de gehele monitoringsperiode

Resultaten monitoring: per use case

Kleine variatie in gemiddeld vermogen en energieverbruik per dag

De machines zijn voornamelijk ingezet op GWW werkzaamheden (70% van de werkdagen). De variatie in gemiddeld vermogen van use case tot use case is bij beide machines klein. Daarmee is het gemiddelde vermogen over alle activiteiten heen een goede indicator voor iedere individuele use case. De use case met het hoogste gemiddelde vermogen (bosbeheer) zit 12% boven het gemiddelde en de use case met het laagste vermogen (rondom spoorwegen) 16% beneden het gemiddelde. Bij de meeste use cases wordt er ongeveer 8 uur per dag gedraaid, behalve bij bosbeheer en rondom spoorwegen (beide 6,6 uur per werkdag).

Tabel 3: DX165W gemiddelde prestaties bij verschillende use cases*

Use case	Eenheid	Bouw huizen	GWW	Bosbeheer	Sloopwerkzaamheden	Rondom spoorwegen
Gemiddeld vermogen	kW	24,2	28,1	31,5	25,2	23,6
Draaiuren / werkdag	Uur	8,0	8,1	6,6	8,3	6,6
Verbruik / werkdag	kWh	193	227	208	208	156
Aantal datapunten**	dagen	159	1036	202	30	27

Tabel 4: DX355LC gemiddelde prestaties bij verschillende use cases*

Use case	Eenheid	GWW	Sloopwerkzaamheden
Gemiddeld vermogen	kW	50	55
Draaiuren / werkdag	Uur	7,8	7,9
Verbruik / werkdag	kWh	391	436
Aantal datapunten**	dagen	128	92

*Gemiddelde prestaties zijn gewogen over alle werkdagen op een bepaalde use case. Daarbij zijn dus de werkdagen van de verschillende aannemers samengenomen.

** Een datapunt is een werkdag van minimaal 1,5 draaiuren en 45 kWh energieverbruik (70 kWh bij de rupsgraafmachine).

Resultaten monitoring: vergelijkende metingen diesel – elektrisch (1) - opzet

Gedurende twee dagen zijn de twee typen elektrische graafmachines (DX165W en DX355LC) uit het project vergeleken met een vergelijkbare dieselmachine (hierbij gaat het om stage IV diesel machines, die aan dezelfde NO_x-normen moeten voldoen als bij stage V, maar aan minder strenge fijnstofnormen). De machines hebben eenzelfde reeks aan activiteiten uitgevoerd, die staan beschreven in tabel 5. Van beide typen machines werd het energieverbruik gemonitord en van de dieselmachines ook de NO_x- en fijnstofemissies. Hierbij zijn drie verschillende meetsystemen gebruikt:

1. Data van het energieverbruik van de machines is verzameld door uitlezing van de digitale databus van de machine, gebruikmakend van een datalogger van TNO. Bij de dieselmachine zijn hiermee ook motorsignalen gelogd.



Figuur 15: elektrische rupsgraafmachine (links), diesel variant (rechts)



2. NO_x-emissies zijn gemeten met de BOEM-kit, een draagbaar NO_x-emissiemeetsysteem van TNO.

3. Fijnstofemissies zijn gemeten met een draagbaar fijnstofemissiemeetsysteem.



Tabel 5: Meetprogramma van de vergelijkende metingen

Type machine	17-ton mobiele graafmachine	17-ton mobiele graafmachine	35-ton rups-graafmachine	35-ton rups-graafmachine
Model	Doosan DX170-diesel	Doosan DX165W	Doosan DX300-diesel	Doosan DX355LC
Testdag	Dinsdag 9 mei 2023	Dinsdag 9 mei 2023	Maandag 8 mei 2023	Maandag 8 mei 2023
Test 0	Koude start, stationair laten lopen		Koude start, stationair laten lopen	
Test 1 (~10 min)	Dumper volladen en klokken		Dumper volladen en klokken	
Test 2 (~30 min)	Sloot graven en dichtgooien 25m		Sloot graven en dichtgooien 25m	
Test 3 (~30 min)	Vak nivelleren 25x25m		Vak nivelleren 25x25m	
Test 4 (~10 min)	-		Dumper volladen en klokken (warm)	
Test 5 (~15 min)	Rond rijden in tweede versnelling			
Test 6 (~15 min)	Stationair laten lopen		Stationair laten lopen	

Resultaten monitoring: vergelijkende metingen diesel – elektrisch (2) : energieverbruik

De metingen omtrent energieverbruik van de 17-ton mobiele graafmachine en de 35-ton rupsgraafmachine zijn goed verlopen. Uit de meetdata kon het brandstofverbruik en de motorefficiëntie berekend worden.

Kleine variatie in gemiddeld vermogen en efficiëntie tussen activiteiten:

Onderstaande tabel laat het gemiddelde vermogen zien aan de krukas van de diesel graafmachines, bij de verschillende activiteiten. De verschillen in gemiddelde motorbelasting zijn klein. Bij beide machines zitten de meeste activiteiten rond de 35% gemiddelde motorbelasting. In de praktijk is de gemiddelde motorbelasting lager, doordat er een hoger aandeel 'idling' is, terwijl er bij deze vergelijkende test vrijwel constant werd doorgewerkt.

De efficiëntie waarmee diesel wordt omgezet in outputvermogen is redelijk constant bij de verschillende activiteiten.

Tabel 6: Gemiddelde motorbelasting en efficiëntie van de diesel machines gedurende de verschillende activiteiten

Activiteit	17-ton mobiele graafmachine		35-ton rupsgraafmachine	
	Gemiddeld vermogen / motorbelasting	Efficiëntie	Gemiddeld vermogen / motorbelasting	Efficiëntie
Dumper volladen en klokken	38 kW / 34%	3,2 kWh / L	59 kW / 30%	3,1 kWh / L
Sloot graven en dichtgooien	40 kW / 36%	3,2 kWh / L	70 kW / 35%	3,2 kWh / L
Vak nivelleren	41 kW / 37%	3,2 kWh / L	70 kW / 35%	3,3 kWh / L
Rondrijden in 2e versnelling	38 kW / 34%	-	-	-
Stationair draaien (warm)	2,2 kW		1,2 kW	

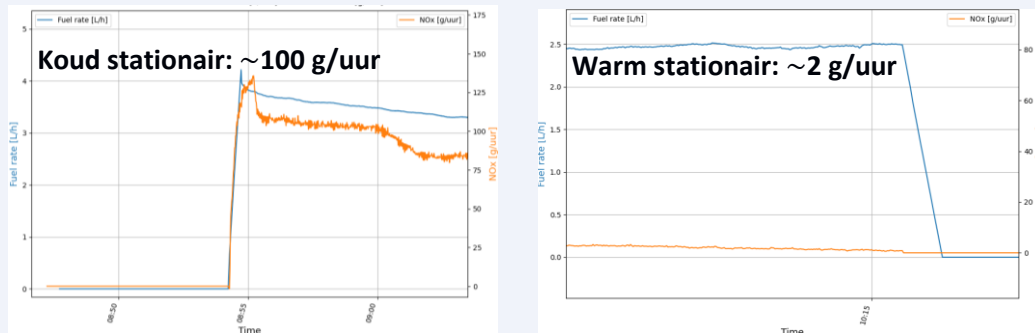
Resultaten monitoring: vergelijkende metingen diesel – elektrisch (3) : emissies

De emissiemetingen van de DX300 zijn over het algemeen goed verlopen. Bij de metingen aan de DX170-diesel is wel het signaal van de NO_x-sensor deels onbruikbaar geworden voor de analyse vanaf test 2 (sloot graven), als gevolg van de zware omstandigheden waaraan de sensor werd blootgesteld.

Gemiddelde NO_x-emissies afhankelijk van tijdsduur test

Het NO_x-reductiesysteem dat op dieselmotoren wordt toegepast is een zogenaamde SCR-katalysator, die pas werkt vanaf ongeveer 200 graden Celcius. Om die temperatuur te halen en vast te houden moet de motor voldoende belast worden.

Figuur 16 laat de NO_x-emissies van de DX300-diesel zijn bij koud stationair draaien (links) en warm stationair draaien (rechts). Bij warm stationair heeft de machine al een uur arbeid achter de rug. Na de koude start, is te zien dat de NO_x-uitstoot langzaam afneemt (oranje lijn). Vervolgens warmt de katalysator gedurende het belasten op, en hoewel de activiteiten 1 t/m 4 (zie tabel 7) vergelijkbaar zijn qua motorbelasting, neemt de gemiddelde NO_x-uitstoot steeds verder af.



Figuur 16: NO_x emissies DX300-diesel bij koud stationair draaien (links, ~100 g/uur) en warm stationair draaien (rechts, ~2 g/uur). De oranje lijn representeert de NO_x-emissies.

Beide machines moeten voldoen aan een NO_x-emissienorm van 0,400 g/kWh. Onderstaande tabellen laten zien dat deze norm gehaald of benaderd kan worden door de geteste machines, maar dat daarvoor de katalysator goed warm moet zijn. De gemiddelde resultaten voor NO_x staan in tabel 8, waarbij de tijdsduur van de test een belangrijke invloed heeft op het resultaat. Hoe de gemiddelde emissies eruitzien gedurende een werkdag is afhankelijk van de manier waarop deze wordt ingezet. Als er langer achtereen wordt gedraaid, met binnen die tijd alleen korte periodes stationair draaien, liggen de emissies lager. Qua fijnstof zijn de emissies niet representatief voor een stage V machine, die zijn namelijk wel uitgerust met een roetfilter.

Tabel 7: NO_x-emissies gedurende de diverse testen

DX300-diesel	Test 1 dumper volladen (koud)	Test 2 sloot graven	Test 3 nivelleren	Test 4 dumper volladen (warm)
NO _x g/uur	291	121	54	19
NO _x g/kWh	5,2	1,7	0,75	0,33
DX170-diesel	Test 1 dumper volladen (koud)	Test 2 slootgraven		
NO _x g/uur	121	54		
NO _x g/kWh	1,8	0,41		

Tabel 8: Gemiddelde NO_x-emissies en gemeten fijnstofemissies (stationaire test)

	Gemiddelde NO _x -emissie over de test (g/kWh)	Fijnstof (aantal deeltjes per cm ³)
17-ton mobiele graafmachine	0,53	2,4 miljoen
35-ton rupsgraafmachine	1,51	3 miljoen

4. Diesel – elektrisch rekenmodel

Om elektriciteitsverbruik en vermeden diesel emissies te berekenen

Diesel-elektrisch rekenmodel: de opzet

Als onderdeel van het project is een 'diesel-elektrisch rekenmodel' gemaakt. Het doel van dit model is om een voorspelling te kunnen geven van energieverbruik en emissiereductie wanneer een dieselgraafmachine zou worden vervangen door een elektrische variant. Er is ervoor gekozen om de inputs van het model eenvoudig te houden, zodat het model gebruikt kan worden door gebruikers van dieselmachines. Hierbij moeten 3 inputs aangegeven worden:

- 1) om welk type machine het gaat (17-ton mobiele graafmachine of 35-ton rupsgraafmachine),
- 2) het nominaal motorvermogen van de te vervangen dieselmachine,
- 3) huidig gemiddeld brandstofverbruik van de dieselmachine (L / uur) (of als dat niet bekend is: de use case waar voornamelijk op gewerkt wordt).

Daarnaast bevat het model een aantal constanten die eventueel aangepast kunnen worden, zoals de aangenomen efficiëntie van de elektrische motor (90%), laadverliezen (15%) en beschikbare uren om te laden (10 uur).

De outputs van het model staan aangegeven in onderstaande beschrijving.

Het model wordt ook gebruikt om de prestaties bij de verschillende use cases met elkaar te kunnen vergelijken.

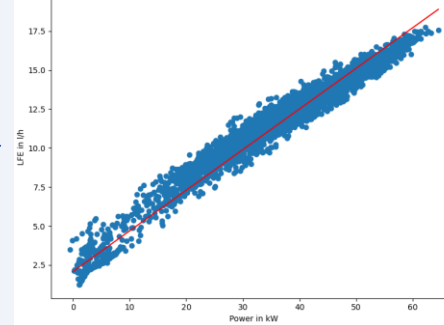
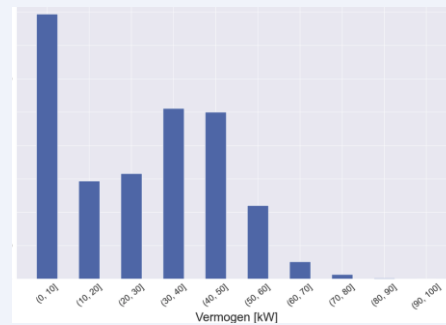
Input

- 1) Type machine (mobiele graafmachine of rupsgraafmachine)
- 2) Motorvermogen van de te vervangen diesel machine
- 3) Gemiddeld brandstofverbruik (ℓ / h) óf use case

Constanten

- 1) Efficiëntie elektromotor
- 2) Laadverliezen
- 3) Aantal uur om te laden

Model



Op basis van de metingen wordt een koppeling gemaakt tussen vermogensbins en brandstofverbruik. Dit leidt tot een relatie tussen de belasting en de efficiëntie van de motor (kWh / ℓ). Daarnaast bevat het model data van: gemiddelde motorbelasting per use case; koolstofintensiteit van energiebronnen (elektriciteit of diesel).

Output

Elektriciteitsverbruik

- kWh_el* / ℓ
- kWh_el / draaiuur
- kWh_el per werkdag
- Minimaal benodigd oplaadvermogen

Emissiebesparing t.o.v. diesel

- Vermeden CO₂-emissies (bij groene en grijze stroommix)
- Vermeden NO_x-emissies
- Vermeden fijnstofemissies

*Energie verbruikt door een elektrische graafmachine gereedeneerd vanuit de stekker t.o.v. een diesel equivalent

Diesel-elektrisch rekenmodel: NO_x-emissies

Emissiecijfers veralgemeniseerd

Omdat elektrische machines tijdens gebruik geen NO_x uitstoten, staat de vermeden emissie gelijk aan de emissie van een vergelijkbare dieselmachine.

Hoeveel die emissie is, hangt sterk af van hoe de dieselmachine wordt gebruikt. Dit was te zien aan de resultaten van de vergelijkende test. Bovendien kan de emissie van machine tot machine verschillen, afhankelijk van de techniek, staat van onderhoud en veroudering.

Op basis van monitoring van machines van verschillende merken, gewichtsklassen, alsmede met verschillende emissienormen en aandrijfconcepten heeft TNO het EMMA-MEPHISTO model ontwikkeld. Daarmee kan worden ingeschat wat de jaarrond gemiddelde emissies zijn van een mobiele dieselmachine.

De NO_x-cijfers uit het model zijn beter algemeen toepasbaar dan de cijfers uit de vergelijkende meting, omdat de onderliggende dataset veel groter is en gebaseerd is op de normale dagelijkse inzet. Wel kan het model ingesteld worden voor specifieke condities; zo is voor deze studie het model gevoed met:

- 1) Het belastingsprofiel van de motor; dit is afgeleid uit de monitoringdata in dit project. Omdat het ombouwmachines betreft, wordt ervan uitgegaan dat de elektrische motor op dezelfde manier belast wordt als de dieselvariant.
- 2) De gewichtsklassen (17 ton en 35 ton)
- 3) De emissienorm: Stage V; ervan uitgaande dat de keuze bij aanschaf gaat tussen een Stage V diesel en een elektrische machine

Resultaten

De berekende gemiddelde emissies zijn:

Tabel 9: NO_x-emissies van een Stage V diesel machine berekend met het EMMA-MEPHISTO model

NO _x emissie	17-tons mobiele graafmachine	35-tons rups-graafmachine
Per eenheid geleverde energie (krukas)	2,6 g/kWh	2,5 g/kWh
Per draaiuur	66 g	117 g
Per dag (8 uur)	527 g	933 g
Per jaar (216 werkdagen)	114 kg	202 kg

Diesel-elektrisch rekenmodel: voorbeelduitwerking

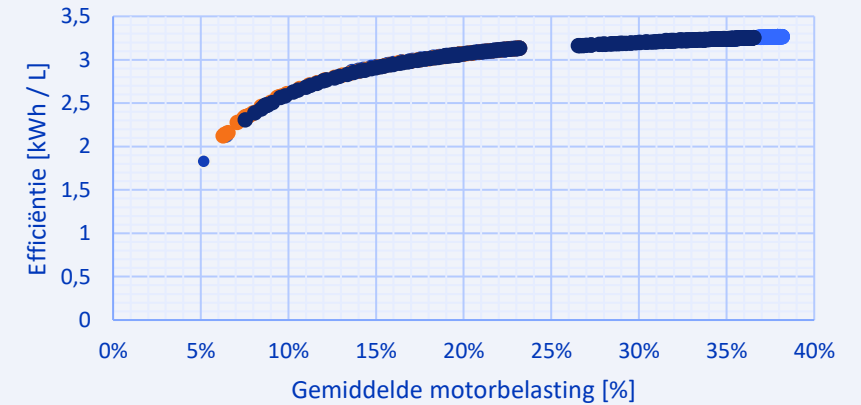
In deze voorbeelduitwerking wordt uitgegaan van de volgende situatie:

Een bedrijf overweegt een DX170-diesel met een vermogen van 110 kW te vervangen voor een vergelijkbare elektrische machine. Het verbruik van de diesel machine is ongeveer 8,5 liter per uur. Hierbij zoekt het bedrijf naar antwoorden op de volgende vragen:

- Hoeveel elektriciteitsverbruik kan verwacht worden over een jaar bij een inzet van 216 werkdagen en 8 draaiuren per werkdag?
- Wat zijn de bespaarde CO₂- en NO_x-emissies over deze periode?

Deze stappen worden uitgevoerd door het rekenmodel:

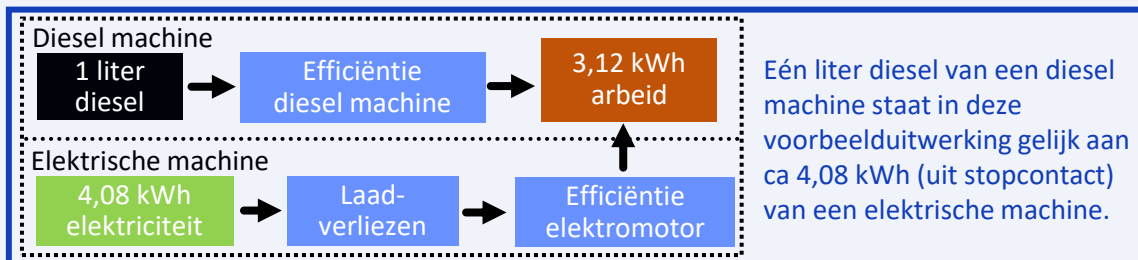
- 1) De afgeleide relatie uit de metingen tussen gemiddeld diesilverbruik en gemiddeld vermogen wordt gebruikt om gemiddeld brandstofverbruik [L / uur] om te rekenen naar gemiddeld vermogen [kW]. Vervolgens wordt dat met behulp van nominaal vermogen motor omgerekend naar gemiddelde motorbelasting [%].
- 2) De afgeleide relatie uit de metingen (zie figuur 17) wordt gebruikt om, op basis van de gemiddelde motorbelasting, de gemiddelde efficiëntie [kWh / L] van de te vervangen diesel machine te bepalen (geleverde arbeid per liter diesel).
- 3) Met behulp van de motorefficiëntie en de laadverliezen van de elektrische variant wordt berekend hoeveel kWh elektriciteit (vanuit het stopcontact) nodig is om de geleverde arbeid van de diesel machine te vervangen. Dit wordt uitgedrukt in kWh elektriciteit per liter diesel [kWh_{el} / L]. Hiermee kan de benodigde elektriciteit (kWh_{el} per draaiuur, per werkdag of per jaar) van de elektrische variant berekend worden (uitgaande van 8 uur per werkdag, 216 werkdagen).
- 4) De koolstofintensiteit van diesel en van de Nederlandse stroommix (o.b.v. ketenemissies, zie appendix A) wordt gebruikt om de bespaarde emissies t.o.v. een diesel te berekenen. De gemiddelde NO_x-uitstoot van de diesel variant, zoals bepaald in slide 21, bepaalt de bespaarde NO_x-emissies over een jaar.
- 5) De gemiddelde kWh_{el} per werkdag wordt vermenigvuldigd met een standaarddeviatie-factor afgeleid uit de energieverbruik per werkdag verdeling van de DX165W (zie slide 13) en gedeeld door de beschikbare uren om te laden om tot het benodigd laadvermogen te komen dat 95% van de werkdagen zou afdekken.



Figuur 17: Uit de metingen van de DX170-diesel afgeleide relatie tussen gemiddelde motorbelasting en efficiëntie (kWh mechanisch per liter diesel).

Input		
DX170 of DX300	DX170	
Gemiddeld brandstofverbruik	8.5	L/uur
Draaiuren per werkdag	8	uur
Output		
kWh _{el} / L	4.08	kWh/L
kWh _{el} / draaiuur	34.7	kWh
kWh _{el} per werkdag	278	kWh
kWh _{el} per jaar (216 werkdagen)	59958	kWh
Bespaarde liters diesel	14688	L
Bespaarde CO ₂ -emissies (2023-stroommix)	31	ton
Bespaarde CO ₂ -emissies (groene stroommix)	46	ton
Bespaarde NO _x -emissies	115	kg
Benodigd laadvermogen (95% vd werkdagen)	43	kW

Figuur 18: Output van het diesel-elektrisch rekenmodel bij gegeven input (aannames: 90% elektromotorefficiëntie, 15% laadverliezen, 10 beschikbare uren om te laden)



Diesel-elektrisch model: resultaten use cases – DX165W

Tabel 10: Energieverbruik resultaten o.b.v. prestaties bij de gemonitorde use cases

Use case	Gemiddeld output vermogen motor ¹	Gemiddelde motorbelasting	Gemiddeld diesel verbruik [L / h]	Gemiddelde efficiënte diesel [kWh / L]	Elektriciteit verbruik [kWh_el / L] ²	kWh_el / draaiuur	kWh_el / werkdag ³
GWW	25.4	23%	8.28	3.11	4.07	33.7	270
Bouw huizen	21.8	20%	7.32	3.07	4.02	29.4	235
Bosbeheer	28.4	26%	9.07	3.15	4.11	37.3	299
Rondom spoorwegen	21.2	19%	7.18	3.06	3.99	28.7	229
Sloopwerkzaamheden	22.7	21%	7.56	3.08	4.03	30.5	244

Tabel 11: Vermeden emissies bij elektrische machine o.b.v. prestaties bij de gemonitorde use cases

Use case	CO2 kg / draaiuur (2023-elektriciteitsmix)	CO2 kg / draaiuur (groene elektriciteitsmix)	CO2 kg / werkdag ³ (2023-mix)	CO2 kg / werkdag ³ (groene mix)	NO _x g / draaiuur	NO _x g / werkdag ³
GWW	17,5	25,7	140	206	67,0	536
Bouw huizen	15,6	22,8	125	182	58,5	468
Bosbeheer	19,1	28,2	153	225	74,2	594
Rondom spoorwegen	15,3	22,3	123	178	57,0	456
Sloopwerkzaamheden	16,1	23,5	129	188	60,6	485

¹Gemiddeld output vermogen = gemiddeld opgenomen vermogen motor × motorefficiëntie (90%).

²Energie verbruikt door een elektrische machine gereedeneerd vanuit de stekker t.o.v. een diesel equivalent.

³Bij 8.0 draaiuren per werkdag.

Diesel-elektrisch model: resultaten use cases – DX355LC

Het gemiddeld output vermogen¹ van de elektrische machines bij de verschillende use cases wordt gebruikt om tot een gemiddelde motorbelasting te komen wanneer deze werkzaamheden met een vergelijkbare diesel machine uitgevoerd zouden worden. Tabellen 10 en 11 bevatten de resultaten van het diesel-elektrisch rekenmodel op basis van de use case resultaten van de DX165W. Onderstaande tabellen 12 en 13 op basis van de use case resultaten van de DX355LC. De resultaten laten zien dat de variatie in gemiddelde efficiëntie erg klein is: 4 kWh_{el} / L is over het algemeen een goede inschatting die aangehouden kan worden.

Tabel 12: Energieverbruik resultaten o.b.v. prestaties bij de gemonitorde use cases

Use case	Gemiddeld output vermogen motor ¹	Gemiddelde motorbelasting	Gemiddeld diesel verbruik [L / h]	Gemiddelde efficiëntie diesel [kWh / L]	Elektriciteit verbruik [kWh _{el} / L] ²	kWh _{el} / draaiuur	kWh _{el} / werkdag ³
GWW	45	23%	14,4	3,11	4,06	58,6	469
Sloopwerkzaamheden	49,5	25%	15,7	3,14	4,10	64,1	513

Tabel 13: Vermeden emissies bij elektrische machine o.b.v. prestaties bij de gemonitorde use cases

Use case	CO2 kg / draaiuur (2023-elektriciteitsmix)	CO2 kg / draaiuur (groene elektriciteitsmix)	CO2 kg / werkdag ³ (2023-mix)	CO2 kg / werkdag ³ (groene mix)	NO _x g / draaiuur	NO _x g / werkdag ³
GWW	30,6	44,8	245	359	112	897
Sloopwerkzaamheden	33,0	48,6	264	389	123	981

¹Gemiddeld output vermogen = gemiddeld opgenomen vermogen motor × motorefficiëntie (90%).

²Energie verbruikt door een elektrische machine geredeneerd vanuit de stekker t.o.v. een diesel equivalent.

³Bij 8.0 draaiuren per werkdag.

5. Conclusies en aanbevelingen

Conclusies en aanbevelingen

De elektrische graafmachines in het 'Bouwplaats van Morgen' project zijn succesvol ingezet

Er is 12,5 jaar aan inzetdata verzameld en de praktijk heeft uitgewezen dat de elektrische graafmachines* qua inzetbaarheid niet onder doen voor hun diesel equivalent. Gemiddeld wordt er 8,0 uur per dag gedraaid en het is zelfs mogelijk gebleken om zeer lange opeenvolgende werkdagen te maken (>18 uur).

Kleine variatie in gemiddeld verbruik tussen use cases

Het energieverbruik per uur is opvallend genoeg redelijk vergelijkbaar voor de verschillende use cases. De use case met het hoogste verbruik is 12% hoger dan het gemiddelde verbruik en de use case met het laagste verbruik 16% lager dan het gemiddelde. Dit betekent dat het energieverbruik van de elektrische machines redelijk voorspelbaar is, wat het mogelijk maakt om in een vroegtijdig stadium inzichtelijk te maken wat voor elektriciteitsaansluiting er nodig is op een project.

De verhouding tussen diesel en elektrisch m.b.t. energieverbruik en emissies is inzichtelijk gemaakt

Bij vervanging van een diesel machine kan voor elke liter diesel ongeveer 4 kWh elektriciteit op de rekening worden verwacht. Data uit de vergelijkende metingen i.c.m. eerder verzamelde data van TNO laten zien dat de te verwachten emissiebesparingen ongeveer 30 ton CO₂ en 114 kg NO_x per jaar zijn voor de mobiele graafmachine en 53 ton CO₂ en 202 kg NO_x voor de rupsgraafmachine (in vergelijking met diesel-Stage V) en o.b.v. 216 werkdagen per jaar uit de monitoring.

Aanbevelingen voor techniek

Een efficiëntieslag kan nog worden gemaakt door de machines van meet af aan als elektrische machine te ontwerpen. De op die manier behaalde reductie van het energieverbruik vermindert ook de laadtijd (of: bij dezelfde laadtijd kan met een lagere stroomsterkte geladen worden, zodat er meer capaciteit overblijft voor het laden van andere machines).

Binnen het project is het niet gelukt om alle telematica-data van de accu's te benutten. Toch is het voor de ontwikkeling relevant om deze data beschikbaar te krijgen, namelijk voor: 1) Bepalen laadverliezen, 2) Verdeling AC/DC laden en eventuele laadlocatie en 3) Bepalen verdeling energieverbruikers (motor, elektronica, cabine airco/heater). Bijkomend voordeel is dat de gebruiker hiermee meer inzicht, en daarmee wellicht meer vertrouwen krijgt in de inzetbaarheid van de machine.

Aanbevelingen voor beleid

Voor een succesvolle inzet van elektrische graafmachines is het van belang dat er een goede laadinfrastructuur is. Eén van de manieren om dit te verwezenlijken is door ervoor te zorgen dat een bouwplaats vroegtijdig is voorzien van een elektrische aansluiting met voldoende capaciteit. Dat kan bijvoorbeeld door het naar voren halen van de aanleg van de permanente aansluiting (bijv. bij woningbouw).

* Met twee verwisselbare accu's van 114 kWh of één accu van 385 kWh (17 tons graafmachine); twee verwisselbare accu's van 385 kWh (35 tons graafmachine)

TNO bedankt alle projectpartners voor de fijne samenwerking, en tevens het SOMA-college voor de gastvrijheid tijdens de vergelijkende metingen.

Daarnaast wordt het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat bedankt voor de cofinanciering van dit DKTI project.

Appendix

Appendix A. Bepalen ketenemissies energiedragers

Per kWh elektriciteit:

- Elektriciteitsmix 2019 (19% groen, 81% grijs) (CE Delft, Ketenemissies elektriciteit, 2022) :
 - Grijs mix directe emissies: 454 g / kWh
 - Grijs mix ketenemissies*: 69 g / kWh
- Elektriciteitsmix 2023 (50% groen, 50% grijs)
 - Ketenemissies elektriciteit uit zon: 61 g / kWh, wind: 14 g / kWh, biomassa: 45 g / kWh
 - => Ketenemissies elektriciteitsmix 2023 (50% grijs, 19% zon, 23% wind, 8% biomassa): 53 g / kWh
 - 2023 directe emissies: 50% * 454 = 227 g / kWh
- => Totale emissies elektriciteitsmix 2023 (incl. ketenemissies): 227 + 53 = 280 g / kWh
- Ketenemissies groene elektriciteitsmix 2023 (38% zon, 46% wind, 16% biomassa): 37 g / kWh
- Koolstofintensiteit diesel (B7 blend, incl. ketenemissies): 3256 g / L (Bron: CO2-emissiefactoren.nl/lijst-emissiefactoren)

* Ketenemissies zijn de emissies over de gehele keten van de elektriciteitsproductie (exclusief de directe emissies). Bij groene stroom bestaan de totale emissies enkel uit ketenemissies.