

# HAALBAARHEIDSONDERZOEK NAAR DE ELECTRIFICATIE VAN ZWARE MOBIELE WERKTUIGEN

---

Samenvatting Onderzoeksrapport

07-01-2020

## Noot voor de lezer:

Het is belangrijk om te vermelden dat de analyse veel aannames bevat en dat veel waarden en cijfers sterk afhankelijk zijn van de specifieke applicatie. Deze analyse is puur illustratief op basis van twee concrete machinetoepassingen, bedoeld om de lezer een beeld te schetsen van de mogelijkheden en uitdagingen rondom elektrificatie van middelgrote bouwmachines.

### Contact SPIKE:

Bas Verkaik

[b.verkaik@spike.global](mailto:b.verkaik@spike.global)

### Contact TNO

Ruud Verbeek

[ruud.verbeek@tno.nl](mailto:ruud.verbeek@tno.nl)

### Contact Connekt

Herman Wagter

[herman.wagter@connekt.nl](mailto:herman.wagter@connekt.nl)

---

# INHOUDSOPGAVE

1.	INLEIDING .....	3
a.	Achtergrond.....	3
b.	Onderzoeksvragen.....	4
c.	Aanpak.....	4
2.	METHODOLOGIE.....	5
a.	Selectie machines.....	5
b.	Energieverbruik en gebruiksprofiel .....	5
c.	Specificatie aandrijflijn.....	6
d.	Besparingspotentieel .....	6
3.	RESULTATEN .....	7
a.	Graafmachine .....	7
b.	Tractor.....	17
4.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN .....	25
5.	VERVOLG .....	26
	Fase 2: Invulling.....	26
	Fase 3: Prototypebouw / Pilot.....	27

# 1. INLEIDING

---

## a. Achtergrond

In dit onderzoek wordt de haalbaarheid van de elektrificatie van een aantal typen mobiele werktuigen onderzocht. Deze mobiele werktuigen, ook wel Non-Road Mobile Machinery (NRMM) genoemd, worden vaak intensief gebruikt en zijn vele uren per dag operationeel. Hierdoor zijn mobiele werktuigen verantwoordelijk voor ruim 9% van de CO<sub>2</sub> uitstoot van de transportsector in Nederland.<sup>1</sup> Doordat deze bouwmachines vaak over een langere periode op dezelfde plek werken leidt dit naast CO<sub>2</sub> uitstoot ook veelal tot een significante verslechtering van de luchtkwaliteit door de uitstoot van afvalstoffen. Zo is 8% van de NO<sub>x</sub> en 12% van de fijnstofuitstoot (PM10) in Nederland afkomstig van mobiele werktuigen. Daarbij heeft een onderzoek van TNO en de Topsector Logistiek aangetoond dat de NO<sub>x</sub>-uitstoot van mobiele werktuigen in de praktijk significant hoger ligt dan de limietwaarde zoals naar voren gekomen bij de laboratoriumtest van deze machines.<sup>2</sup> Dat verschil wordt met name veroorzaakt door het in de praktijk relatief grote deel waarin deze machines stationair of lage last draaien (18 tot 57%), waarin weinig arbeid geleverd wordt, maar wel relatief veel NO<sub>x</sub> wordt uitgestoten. Met name in grote en langdurige binnenstedelijke bouwprojecten kan dit tot forse gezondheidsrisico's leiden.

De elektrificatie van deze mobiele werktuigen kan zorgen voor een grote vermindering van CO<sub>2</sub> uitstoot en een eliminatie van de uitstoot van lokale afvalstoffen en fijnstof. Daarnaast is een elektromotor efficiënter, zijn de onderhoudskosten een stuk lager en zorgen ze voor een vermindering van geluidsoverlast. Ondanks deze voordelen blijft het gebruik van elektrische bouwmachines echter achter ten opzichte van andere voertuigen. Hoewel het aanbod van kleine elektrische bouwmachines toeneemt worden deze nog niet veelvuldig gebruikt.<sup>3</sup> Dit komt onder anderen door de hogere aanschafprijs en beperkte laadinfrastructuur, maar ook door de onwetendheid en onzekerheid van bouworganisaties. Grote bouwmachines zijn daarentegen nog helemaal niet in beeld, terwijl juist deze machines een zeer grote impact hebben op de landelijke CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> uitstoot (zie Tabel 1). Daarnaast zorgen recente ontwikkelingen zoals de landelijke stikstofcrisis ervoor dat de vraag naar grote elektrische bouwmachines aanzienlijk toeneemt<sup>4</sup>

In dit onderzoek is de haalbaarheid van elektrificatie van een tweetal typen middelgrote bouwmachines onderzocht. Het onderzoek is gebaseerd op actuele gebruiksdata van de machines geanalyseerd in het TNO Connekt/PBL-meetprogramma uit 2018. Door gebruik te maken van deze data worden de dagelijkse gebruiksprofielen van deze machines over een langere tijd inzichtelijk gemaakt. Op deze manier kunnen concrete conclusies getrokken worden over de benodigde accucapaciteit, elektromotor en potentiële besparingen die elektrificatie met zich meebrengt.

---

<sup>1</sup> Methods for calculating the emissions of transport in the Netherlands, Klein et al., 2018

<sup>2</sup> De inzet van bouwmachines en de bijbehorende NO<sub>x</sub>- en CO<sub>2</sub>-emissies, TNO, juli 2018

<sup>3</sup> Elektrische mobiele werktuigen in beeld, een overzicht van het aanbod van elektrische en hybride mobiele machines, Natuur & Milieu en BMWT, september 2019

<sup>4</sup> Verbraeken, H. (2019, 20 oktober) Vraag naar elektrische bouwmachines groeit, aanbod blijft nog achter. Financieel Dagblad (retrieved from [://fd.nl/achtergrond/1324192/vraag-naar-elektrische-bouwmachines-groeit-aanbod-blijft-nog-achter#](https://fd.nl/achtergrond/1324192/vraag-naar-elektrische-bouwmachines-groeit-aanbod-blijft-nog-achter#))

Machinetype	Vermogen	CO <sub>2</sub> uitstoot per jaar [in duizend ton]	Gemiddelde CO <sub>2</sub> uitstoot per machine [ton/stuk]
Graafmachines	75 - 130 kW	212	41.7
Laadschoppen	130 - 300 kW	203	97.4
Landbouwtrekkers	130 - 300 kW	151	43.8
Laadschoppen	75 - 130 kW	116	38.1
Graafmachines	130 - 300 kW	99	75.9
Laadschoppen	300 - 560 kW	45	209.8
Graafmachines	18 - 37 kW	32	11.5
Laadschoppen	37 - 75 kW	27	23.0
Graafmachines	38 - 75 kW	26	22.4
Graafmachines	300 - 560 kW	25	185.2
Bulldozers	130 - 300 kW	15	99.4
Dumpers	130 - 300 kW	15	95.9

Tabel 1: CO<sub>2</sub> uitstoot per jaar van verschillende mobiele werktuigen<sup>2</sup>

## b. Onderzoeksvragen

Dit project streeft ernaar om voor een aantal bouwmachines concrete conclusies te kunnen trekken over de potentie en voordelen van een elektrisch aandrijfsysteem. Het project zal daarbij inzicht verschaffen in:

- Het typische gebruiksprofiel en elektrisch energieverbruik van de onderzochte bouwmachines
- Globaal ontwerp van de elektrische aandrijflijn voor de machinetypen waar gebruiksdata van is verzameld en een globale inpassingscheck in de machines.
- Globaal inzicht in (meer)kosten en eventuele terugverdientijd t.o.v. een machine met dieselmotor

## c. Aanpak

Dit onderzoek is gebaseerd op actuele gebruiksdata van het TNO Connekt/PBL-meetprogramma uit 2018, waarin een viertal machines intensief gevolgd zijn om meer inzicht te verschaffen in de inzet en emissies van deze bouwmachines tijdens normaal gebruik. Aangezien deze meetdata een representatief beeld geeft van het gebruiksprofiel van deze bouwmachines, wordt deze data in dit onderzoek ook gebruikt om de haalbaarheid en besparingspotentie van een elektrisch aandrijfsysteem te analyseren. Op basis van het typische energieverbruik en gebruiksprofiel wordt vervolgens een aandrijfsysteem voorgesteld en globaal ingepast in deze machines, op basis waarvan de meerkosten en terugverdientijd berekend kunnen worden.

## 2. METHODOLOGIE

---

### a. Selectie machines

Tijdens het TNO Connekt/PBL-meetprogramma is er data verzameld voor 4 verschillende machines: een laadschop, tractor en twee graafmachines. Elk van deze machines zijn uitgerust met het TNO Smart Emission Measurement System (SEMS)<sup>5</sup> waarbij sensoren gebruikt worden om onder anderen CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>-emissies te kunnen meten. Voor de verschillende machines waren verschillende parameters beschikbaar om uiteindelijk de massastroom en daarmee emissies te kunnen bepalen. Alleen voor één graafmachine en de tractor kon het brandstofverbruik en het koppel en toerental uit de ECU (Engine Control Unit) van het voertuig afgehaald worden, terwijl deze data voor de andere graafmachine niet volledig was en voor de laadschop is de dataverzameling tevens zeer minimaal, waardoor de analyse in dit onderzoeksrapport beperkt wordt tot één graafmachine en de tractor. Samenvattend worden dus de volgende machines in dit onderzoek meegenomen:

1. Caterpillar 326F/L Graafmachine
2. Valtra N154 Tractor

### b. Energieverbruik en gebruiksprofiel

Om de benodigde dagelijkse energievraag van de bouwmachines te bepalen is het van belang om de dagelijkse vermogensvraag te bepalen. Hiervoor wordt het brandstofverbruik van de machines als uitgangspunt genomen, waarbij het vermogen met de volgende formule berekend wordt:

$$P = 0,84 \times FF / BSFC - 0,02 \times P_{\max}$$

waarin:

- P: Vermogen in kW
- FF: Fuel Flow in liter per uur
- BSFC: Brake-specific fuel consumption in kg per kWh
- P<sub>max</sub>: Maximaal vermogen in kW

Voor BSFC wordt voor beide machines een waarde van 220 g/kWh aangenomen<sup>67</sup>

Met het gemiddelde vermogen kan vervolgens de dagelijkse energievraag in kWh berekend worden. Om een beter beeld te krijgen van de verdeling van de vermogens over de tijd is ook de distributie van de vermogens geplot over een dag. Met deze data kunnen de benodigde specificaties van de elektromotor en benodigde accucapaciteit gespecificeerd worden.

---

<sup>5</sup> A smart and robust NO<sub>x</sub> emission evaluation tool for the environmental screening of heavy-duty vehicles, R.J. Vermeulen, N.E. Ligterink, W.A. Vonk, H.L. Baarbé (2012)

<sup>6</sup> Op basis van Cat® C7.1 ACERT™ Industrial Power Unit Industrial Specification Sheet (LEHH0542-01)

<sup>7</sup> Op basis van 3rd Generation Series 4-Cylinder Diesel Engine Specification Sheet (retrieved from <http://www.deag.ch/de/assets/contentfiles/downloads/SISU%20Datenblatt%204-Zyl.pdf>)

Om verschillende scenario's te onderzoeken is tevens het dagelijkse gebruiksprofiel van de verschillende machines in kaart gebracht. Door de frequentie en duur van pauzes inzichtelijk te maken kan hieruit het oplaadpotentieel van de machines gedurende de dag bepaald worden. Hiervoor zijn de periodes genomen waarin de motor uit stond. Eventuele pauzes gedurende idle-time van de motor zijn dus niet meegenomen.

### c. Specificatie aandrijflijn

Op basis van het dagelijkse energieverbruik en typische vermogensverdeling van de machines kan een inschatting gemaakt worden van de specificaties waaraan het aandrijfsysteem moet voldoen. De voornaamste componenten die hierin belangrijk zijn betreffen het batterijpakket, elektromotor en motorcontroller. Om de analyse te versimpelen worden overige componenten niet meegenomen en wordt verder aangenomen dat de elektromotor aan de bestaande hydraulische pomp wordt gekoppeld. Op basis van de benodigde specificaties van het aandrijfsysteem kan vervolgens het volume, gewicht en prijs van geschikte beschikbare elektromotor en motorcontroller uiteengezet worden. Daarnaast wordt een inschatting gemaakt van de specificaties van het batterijpakket indien de machine een gehele dag operationeel moet zijn.

Om te bepalen of een dergelijk elektrisch aandrijfsysteem potentieel haalbaar is wordt ook een globale inpassing gedaan in de machines. Hiertoe wordt een schatting gemaakt van het overgebleven volume en gewicht indien de dieselmotor en brandstoftank weggelaten worden, zodat de maximaal haalbare energiec capaciteit en bijbehorende benodigde gewicht van het aandrijfsysteem kan worden bepaald.

### d. Besparingspotentieel

Met het besparingspotentieel wordt de financiële besparing bedoeld die potentieel behaald kan worden door elektrificatie van de bouwmachines.

De financiële besparing wordt bepaald door de terugverdientijd te berekenen van een elektrische bouwmaschine ten opzichte van een conventionele machine bij het typische gebruiksprofiel van de betreffende machine. Voor het berekenen van de terugverdientijd wordt de terugverdientijdmethode gebruikt die is opgesteld door TNO en ECN in 2018<sup>8</sup>:

$$TVT = (I + F) / B,$$

waarin:

- TVT: de terugverdientijd in jaren;
- I: de (meer)investering in euro's;
- F: de kosten voor de financiering van de (meer)investering in euro's;
- B: de jaarlijkse kostenbesparing in euro's

---

<sup>8</sup> Eindrapport Methodiek voor de bepaling van de terugverdientijd van energiebesparende maatregelen, TNO 2018 M11184 (retrieved from <http://publications.tno.nl/publication/34634246/Uulf5s/TNO-2018-M11184.pdf>)

## 3. RESULTATEN

---

### a. Graafmachine



Figuur 1: Caterpillar 326 F/L rupsgraafmachine

De graafmachine uit het onderzoek betreft een Caterpillar 326 F/L rupsgraafmachine met C7.1 ACERT dieselmotor, welke gedurende een periode van 21 dagen is gevolgd met een totale meettijd van 131 uur. Daarnaast zijn tijdens het meetprogramma ook metingen verricht aan een Komatsu 290 PC rupsgraafmachine met SAA6d107e-3 dieselmotor, welke gedurende een periode van 50 dagen is gevolgd met een totale meettijd van 291 uur. Gezien de vergelijkbare grootte van deze machines wordt deze tweede graafmachine niet volledig meegenomen in het onderzoek. Ter vergelijking wordt wel het dagelijkse energieverbruik en vermogensverdeling van deze tweede graafmachine in de analyse meegenomen.

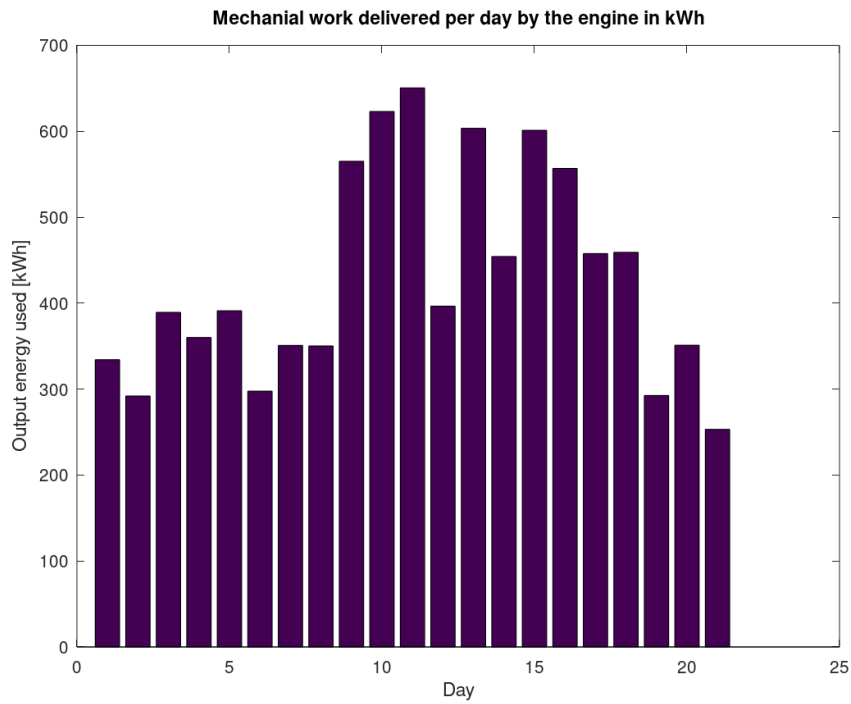
#### 1. *Energieverbruik en gebruiksprofiel*

Het energieverbruik en gebruiksprofiel is in de Figuren 2 t/m 6 weergegeven. Figuur 2 laat het dagelijkse energieverbruik van de graafmachine zien. Uit de figuur blijkt dat de dagelijkse energievraag, op een paar uitzonderingen na, nagenoeg altijd 300 kWh of meer is, waarbij de grootste energievraag ruim 600 kWh bedraagt.

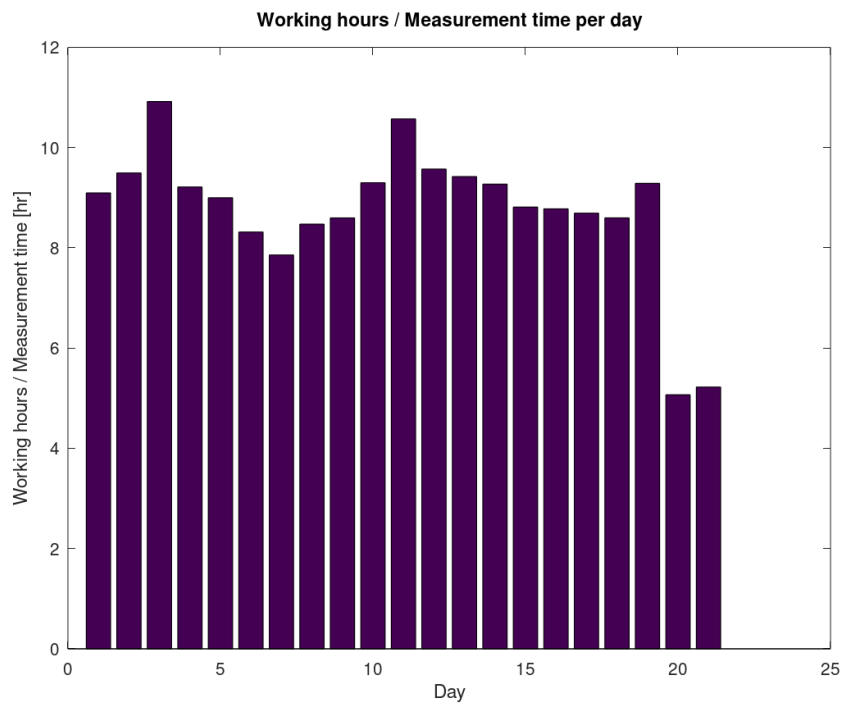
Om een beeld te schetsen van het gebruiksprofiel laat Figuur 4 de lengte van de pauzes tussen verschillende shifts zien. De duur van pauzes varieert tussen 30 en 60 minuten met het zwaartepunt rond 45 minuten.

Om de specificatie van de totale aandrijflijn te kunnen bepalen wordt ook het piek- en nominaal vermogen van de motor uiteengezet. In Figuur 5 is hiervoor het piekvermogen en het gemiddelde vermogen per dag uitgezet. Uit deze figuur wordt duidelijk dat het piekvermogen iedere dag benut wordt, terwijl het nominale vermogen van de motor varieert tussen grofweg 40 en 70 kW.

Om meer beeld te krijgen van hoe de vermogens verdeeld zijn over de tijd, is ook de distributie van de vermogensvraag geplot in Figuur 6. Deze figuur laat zien dat het zwaartepunt voor de CAT 326 F/L bij de hogere vermogens ligt.

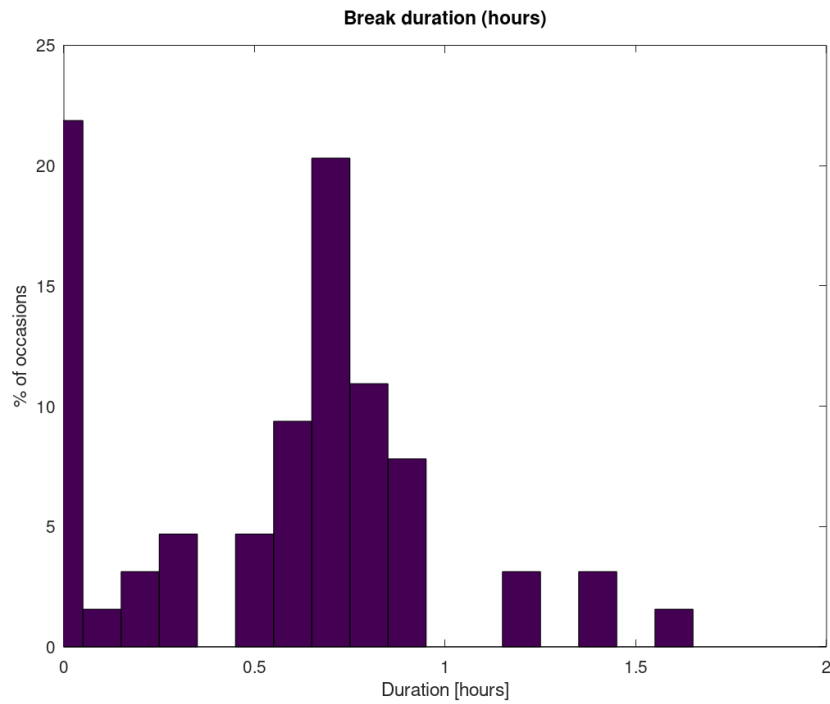


Figuur 2: Dagelijkse energieconsumptie van de CAT 329 F/L graafmachine (in kWh)

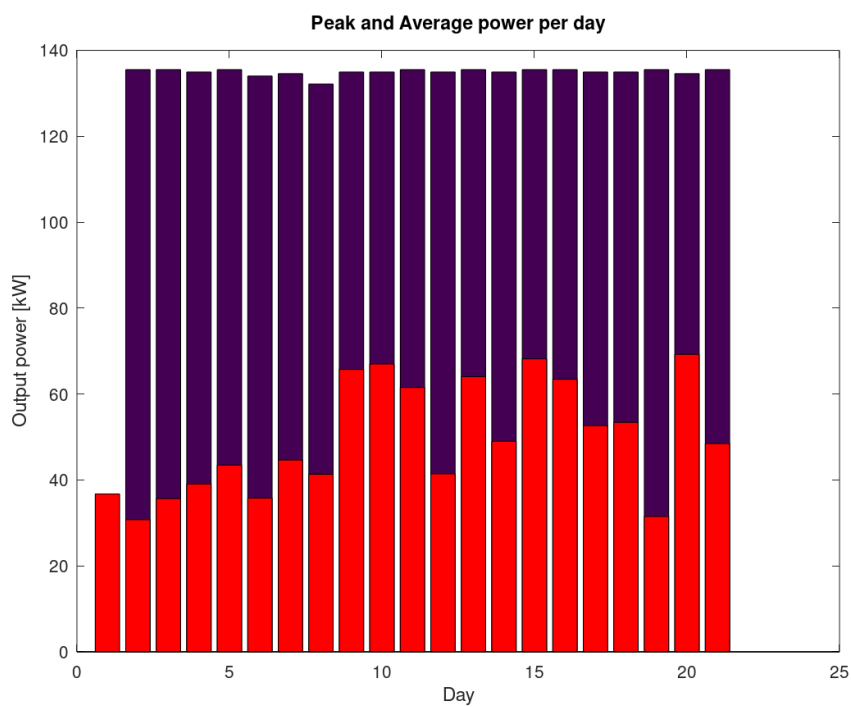


Figuur 3: Dagelijkse werkuren van de CAT 329 F/L graafmachine (in uren)

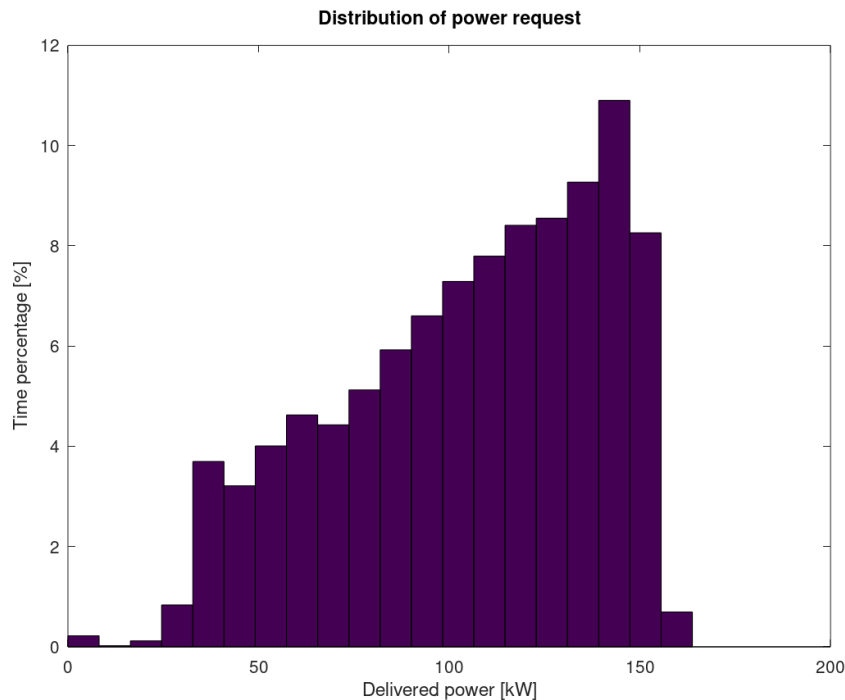




Figuur 4: Duur van pauzes tussen shifts van de CAT 329 F/L graafmachine (in uren) vs. tijd



Figuur 5: Dagelijkse Piek (blauw) - en gemiddelde (rood) vermogensvraag van de CAT 326 F/L graafmachine (in kW)



Figuur 6: Vermogensverdeling van de CAT 326 F/L graafmachine (in kW) vs. tijd

## 2. Aandrijfsysteem

### Batterijpakket en laadinfrastructuur

Uit de analyse van het dagelijkse energieverbruik volgt dat de dagelijkse energievraag varieert tussen minimaal 300 en maximaal ruim 650 kWh. Een batterijpakket dat in alle omstandigheden een volledige dag onafgebroken werk moet garanderen heeft dus meer dan 650 kWh aan accucapaciteit nodig.

#### Laadinfrastructuur

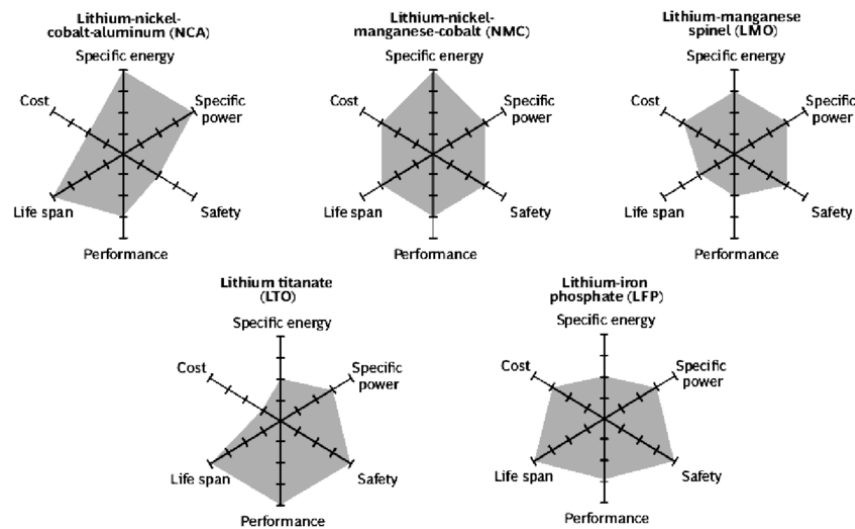
Hoewel een batterijpakket van een dergelijke capaciteit overdag doorgaans niet bijgeladen hoeft te worden, moet deze 's nachts uiteraard wel weer volgeladen worden om de dag erna weer mee te kunnen werken. Om dit binnen een nacht te voltooien moet een krachtstroomelektriciteitsaansluiting gerealiseerd worden, wat op sommige afgelegen plaatsen nog een uitdaging kan zijn. Met een driefasen krachtstroomaansluiting op 400V van 3x63A is het in de praktijk echter niet mogelijk om een pakket van 650 kWh 's nachts op te laden, zeker niet gezien de lange werkdagen die geregeld gemaakt worden (zie Figuur 3).

Zoals in de grafiek te zien is komt een dagelijkse energievraag van ruim 650 kWh echter maar sporadisch voor. Een alternatieve en meer realistische oplossing is daarom om een kleiner batterijpakket te integreren dat in een groot deel van de dagelijkse energiebehoefte kan voorzien, en eventueel tussentijds opgeladen of gewisseld moet worden voor dagen met hogere energievraag. Uit de data volgt dat de gemiddelde energiebehoefte per dag van de graafmachine 430 kWh is. Met een dergelijke grootte pakket kan het grootste deel van de dagen al bediend worden zonder tussendoor bij te laden, terwijl voor de overige dagen gewisseld of bijgeladen moeten worden. Het is technisch mogelijk om het batterijpakket

binnen de duur van pauzes (uitgaande van een twee uur) volledig op te laden. Om dat te realiseren zou dan echter wel een snellaadaansluiting (van bijvoorbeeld 3x220A) noodzakelijk zijn die niet op veel bouwplaatsen voorhanden is. Om dit mogelijk te maken zou bijvoorbeeld een groot aggregaat of butterbatterij noodzakelijk zijn die in deze energiebehoefte kan voorzien. Vooral bij gebruik van meerdere elektrisch aangedreven bouwmachines kan dit uitdagend zijn.

### Batterijspecificaties

Er bestaan verscheidene leveranciers van batterijpakketten, welke gebruik kunnen maken van verschillende soorten batterijcellen. Figuur 7 geeft een globaal overzicht van verschillende batterijsoorten die elk hun specifieke voor- en nadelen hebben. Bovenop het gebruik van verschillende cellen verschillen leveranciers in andere zaken als prijs, kwaliteit, garantie etc. Voor dit rapport wordt uitgegaan van een batterijpakket dat ten minste 10 jaar mee kan en een prijsrange heeft van €250-500 per kWh.



Figuur 7: Tradeoffs tussen verschillende soorten Lithium-ion cellen <sup>9</sup>

Ter illustratie wordt een mogelijk batterijpakket voorgesteld die bestaat uit SPIKE-standaardmodules op basis van NCA chemie van 48 volt met geïntegreerd batterijmanagement systeem die eenvoudig aan elkaar te koppelen zijn om de gewenste spanning en capaciteit te behalen. De specificaties van mogelijke batterijpakketten die in een dagelijkse behoefte van 650 (het maximale verbruik) en 430 kWh (het gemiddelde verbruik) kunnen voldoen zijn in Tabel 2 samengevat.<sup>10</sup>



<sup>9</sup> BCG Research (2010): Batteries for Electric Cars. Retrieved from: <https://www.bcg.com/documents/file36615.pdf>

<sup>10</sup> Om de levensduur van batterijpakketten te verlengen wordt aangeraden niet alle capaciteit van de pakketten volledig te benutten. Hier wordt uitgegaan van een bruikbare capaciteit van ca. 90%

Item	Specificaties batterijpakket met bruikbare capaciteit van ca. 650 kWh	Specificaties batterijpakket met bruikbare capaciteit van ca. 430 kWh
Nominal capacity	898Ah / 723,9kWh	599Ah / 482,6kWh
Nominal usable capacity	~650 kWh	~430 kWh
Nominal voltage	806,4V	806,4V
Minimal voltage	560V	560V
Maximum voltage	940,8V	940,8V
Operating voltage range	672V - 918,4V	672V - 918,4V
Max. continuous discharge	866A / 698,5kW	578A / 465,7kW
Peak discharge	2.599A / 2.095,6kW	1.733A / 1.397,1kW
Standard charge	433A	289A
Max. charge	866,25A	577,5A
Charge temperature	0 to 45°C	0 to 45°C
Discharge temperature	-20 to 60°C	-20 to 60°C
Expected cycle life	1500	1500
Weight	4144 kg	2763 kg
Volume	2795 L	1863 L

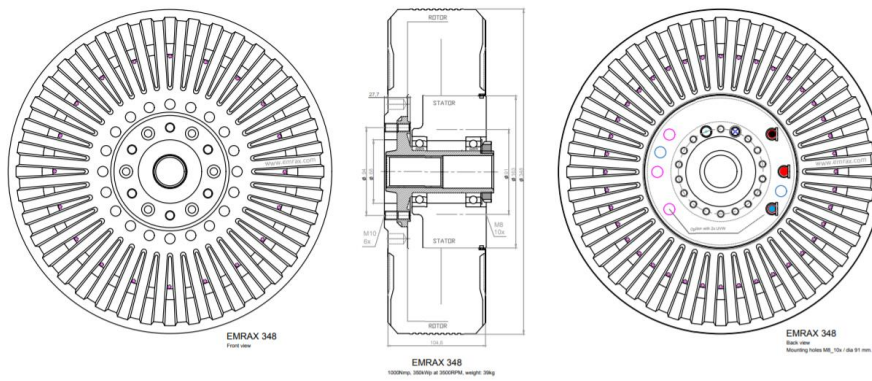
Tabel 2: Specificaties 643,5 en 321,8 kWh batterijpakket t.b.v. rupsgraafmachine

### Overige aandrijfcomponenten

Om de specificaties van de overige aandrijfcomponenten, de elektromotor en motorcontroller, te bepalen, is de dagelijkse vermogensvraag van belang. Op basis van de dagelijkse vermogensvraag zou een aandrijflijn met een elektromotor en motorcontroller die nominaal 70 kW kunnen leveren over het algemeen moeten voldoen, ervan uitgaande dat piekvermogens tot het dubbele vermogen mogelijk zijn. Uit de data is echter niet te achterhalen hoe lang de piekvermogens worden aangehouden. Dit zal een nadere analyse moeten uitwijzen. Daarom wordt in de analyse nu componenten gekozen die in ieder geval voldoet.

Net als batterijleveranciers bestaan er ook verscheidene leveranciers van elektrische aandrijfcomponenten. Ter illustratie worden voorbeeldcomponenten gebruikt die aan de gewenste specificaties voldoen. De elektromotor Emrax type 348<sup>11</sup> voldoet ruim aan specificaties volgend uit de meetdata. De specificaties van deze motor worden samengevat in Tabel 3.

<sup>11</sup> EMRAX 348 Technical Data Table. Retrieved from <https://emrax.com/products/emrax-348/>

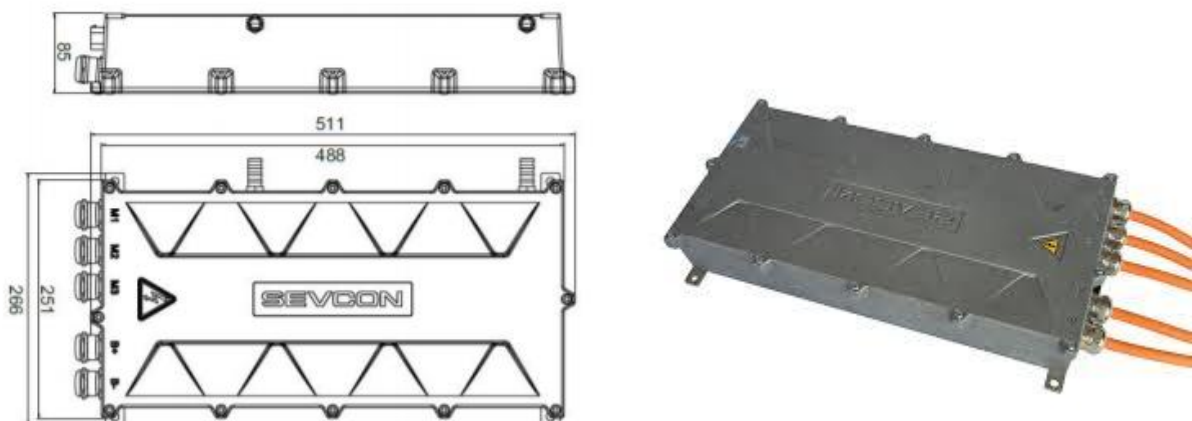


Figuur 8: Emrax 348 motor<sup>12</sup>

Continuous Power [kW]	150
Peak Power [kW]	300
Nominal Voltage [V]	800
Weight [kg]	40
Diameter [mm]	348
Axial Length [mm]	107
Volume [L]	10,2
Estimated costs [€]	11.000,-

Tabel 3: Specificaties Emrax 348 motor

De SEVCON Gen4-S10<sup>12</sup> is een motorcontroller die voldoet aan dezelfde specificaties en daarmee zeer geschikt is om te gebruiken in combinatie met de Emrax Type 348 motor.



Figuur 9: Sevcon Gen4-S10 motorcontroller<sup>12</sup>

<sup>12</sup> SEVCON Gen4-Size10 data sheet. Retrieved from <http://www.sevcon.com/products/high-voltage-controllers/gen4-s10/>

Continuous Power [kW]	150
Peak Power [kW]	300
Nominal Voltage [V]	800
Weight [kg]	10,9
Length [mm]	511
Width [mm]	266
Height [mm]	85
Volume [L]	11,2
Estimated costs (€)	7500

Tabel 4: Specificaties Sevcon Gen4-S10 motorcontroller

### Beschikbare ruimte

De beschikbare ruimte voor het aandrijfsysteem is zeer globaal afgeschat door het volume en gewicht te bepalen dat grofweg vrijkomt door de verbrandingsmotor en brandstoftank weg te halen.

Het volume dat vrijkomt door verwijdering van de verbrandingsmotor is bepaald op basis van Figuur 10<sup>13</sup>, wat neerkomt op 1550 L. Het gewicht van de motor is 788 kg<sup>8</sup>.

Het volume dat vrijkomt door verwijdering van de brandstoftank is bepaald door de tankinhoud van de graafmachine te bepalen, wat neerkomt op 474 L<sup>14</sup>. Op basis van de soortelijke massa van diesel geeft dit een gewichtsbesparing van 398 kg.

Op basis van de dimensies van het batterijpakket en overige aandrijfcomponenten zou een pakket van 430 kWh relatief eenvoudig in te passen moeten zijn in het volume dat vrijkomt door de dieselmotor en brandstoftank te verwijderen. Met een gewicht van ca. 2800 kg zorgt het batterijpakket wel voor een significante gewichtstoename.

Gezien de noodzaak voor contragewichten in veel graafmachines zal de gewichtstoename van het batterijpakket echter geen enkel probleem vormen. Gezien het gewicht van het batterijpakket zou het in potentie zelfs mogelijk zijn om de contragewichten (deels) te vervangen voor een batterijpakket, waarbij dus ook een deel van dit additionele volume benut kan worden ten behoeve van additionele capaciteit.

De afmeting van het contragewicht is zeer grof afgeschat op basis van Figuur 11. Het beschikbare volume wordt hiermee:

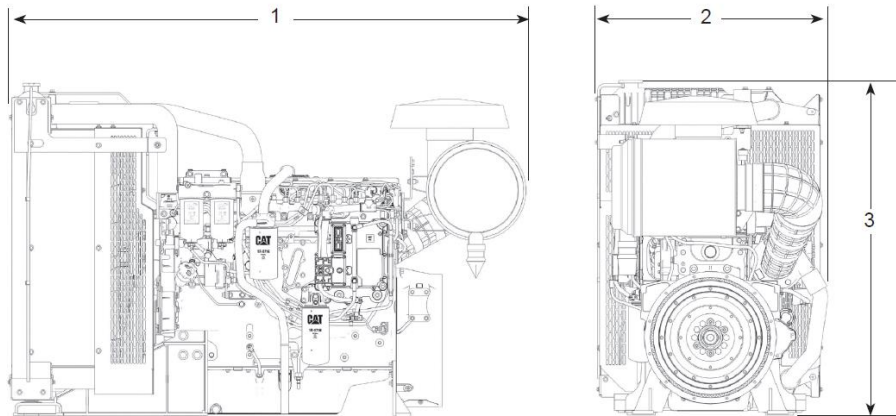
$$B*(A-E)*(F-\frac{1}{2}G) = 2,934 * (2,996 - 1,088) * (2,947 - \frac{1}{2} * 4,640) = 3,51 \text{ m}^3 = 3510 \text{ L}$$

De beschikbare contragewichten voor de Caterpillar 326 F/L graafmachine wegen tussen de 4000 kg (standaard) of 6750 kg (zwaar).

Aannemend dat dit volume beschikbaar is voor batterijen met een energiedichtheid van 300 Wh/L zou dit volume, in combinatie met het volume dat beschikbaar komt door verwijdering van de verbrandingsmotor, ruimschoots genoeg moeten zijn om een batterijpakket van 650 kWh in kwijt te kunnen. Daarnaast zou het batterijpakket qua gewicht het contragewicht kunnen vervangen, waarbij het zelfs noodzakelijk kan zijn om additioneel gewicht toe te voegen aan het batterijpakket

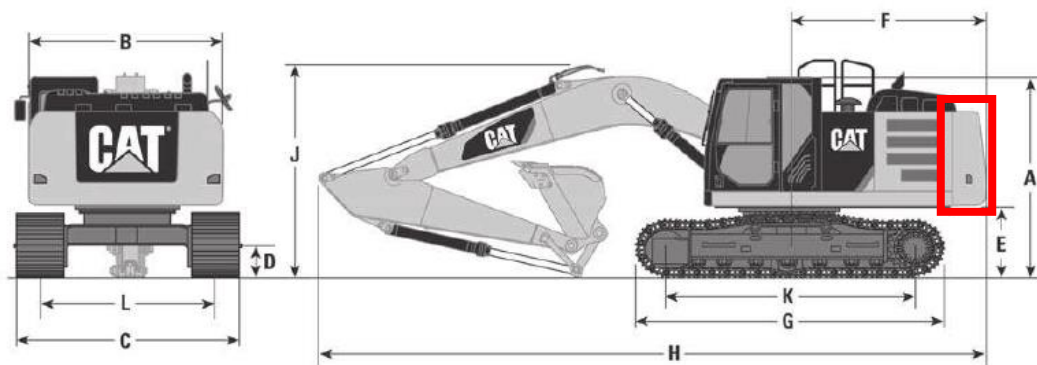
<sup>13</sup> Cat® C7.1 ACERT™ Industrial Power Unit Industrial Specification Sheet (LEHH0542-01)

<sup>14</sup> Product Specifications for 326 (retrieved from [https://www.cat.com/en\\_IN/products/new/equipment/excavators/medium-excavators/4143618402364297.html#](https://www.cat.com/en_IN/products/new/equipment/excavators/medium-excavators/4143618402364297.html#))



(1) Length — 1728 mm (68 in)      (2) Width — 788 mm (31 in)      (3) Height — 1140 mm (44.8 in)

Figuur 10: Dimensies CAT C7.1 ACERT motor<sup>3</sup>



Figuur 11: Dimensies CAT 326 F/L rupsgraafmachine<sup>14</sup>

Massa [kg]	Diesel (zonder conragewicht)	Diesel (met conragewicht)	Elektrisch (650 kWh)	Elektrisch (430 kWh)
Dieselmotor [kg]	788	788		
Brandstoftank [kg]	398	398		
Conragewicht [kg]		6750		
Elektromotor [kg]			40	40
Motorcontroller [kg]			10,9	10,9
Batterijpakket [kg]			4144	2763
<b>Totale Massa</b>	<b>1186</b>	<b>7936</b>	<b>4194,9</b>	<b>2813,9</b>
Volume [L]	Diesel (zonder conragewicht)	Diesel (met conragewicht)	Elektrisch (650 kWh)	Elektrisch (430 kWh)
Dieselmotor [L]	1550	1550		
Brandstoftank [L]	474	474		
Conragewicht [L]		3510		
Elektromotor [L]			10,2	10,2
Motorcontroller [L]			11,2	11,2
Batterijpakket [L]			2795	1863
<b>Totaal volume [L]</b>	<b>2024</b>	<b>5534</b>	<b>2816,4</b>	<b>1884,4</b>

Tabel 5: Vergelijking volume en gewicht van diesel en elektrische graafmachine

### 3. Besparingspotentieel

Om het besparingspotentieel te bepalen wordt de terugverdientijd berekend met behulp van de volgende formule:

$$TVT = (I + F) / B,$$

waarin:

- TVT: de terugverdientijd in jaren;
- I: de (meer)investering in euro's;
- F: de kosten voor de financiering van de (meer)investering in euro's;
- B: de jaarlijkse kostenbesparing in euro's

De meerinvestering wordt bepaald door het verschil in prijs van de dieselmachine en elektrische machine. Hierbij worden ook eventuele subsidies of fiscale voordelen meegenomen. De Milieu-Investeringsaftrek (MIA) en VAMIL regeling zijn twee fiscale regelingen die voor elektrische bouwmachines van toepassing zijn. Op de milieulijst vallen deze onder de categorie F3413 van elektrisch aangedreven mobiele werktuigen<sup>15</sup>. Voertuigen die onder deze categorie vallen kunnen met de Milieu-investeringsaftrek profiteren van een investeringsaftrek die kan oplopen tot 36% van het aanschafbedrag.

Met de VAMIL regeling kan een onderneming 75% van de investeringskosten afschrijven op een willekeurig moment wat een significant liquiditeitsvoordeel kan opleveren ten opzichte van reguliere afschrijving. Gemiddeld zorgt dit, afhankelijk van de afschrijvingstermijn en rentepercentage, voor een voordeel van ca. 3% van het investeringsbedrag.

Om het besparingspotentieel te berekenen wordt uitgegaan van de gemiddelde energiebehoefte over de meetperiode (430 kWh), waarbij aangenomen wordt dat de batterijcapaciteit precies in de gemiddelde dagelijkse energiebehoefte kan voldoen. Alle uitgangspunten zijn hieronder samengevat:

- Gemiddeld dagelijks elektriciteitsverbruik is 430 kWh
- Gemiddeld dagelijks dieselverbruik is 115 liter.
- Kosten elektriciteit bedragen €0,14 per kWh
- Kosten diesel bedragen €1,22 per liter
- Aantal draaidagen per jaar is 200
- All-in prijs van batterijpakket is €350 per kWh
- Grootte batterijpakket is gelijk aan gemiddeld elektriciteitsverbruik per dag
- Levensduur batterijpakket en machine is 10 jaar
- Levensduur dieselmachine is 10 jaar
- Onderhoudskosten zijn gelijk
- Milieu-investeringsaftrek (MIA) regeling wordt toegepast uitgaande van 25% fiscale winstbelasting
- Nieuwkosten dieselmotor bedraagt €32.500
- Financieringskosten van de meerinvestering wordt niet meegenomen, daar wordt gesteld dat deze gecompenseerd wordt met de aftrekvoordelen van de VAMIL regeling.

---

<sup>15</sup> MIA \ Vamil Brochure en Milieulijst 2019 (retrieved from <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2019/02/Brochure%20en%20Milieulijst%202019.pdf>)



Met bovengenoemde uitgangspunten kan de terugverdientijd berekend worden, welke uitkomt op een kleine 7 jaar. Een samenvatting van een voorbeeldberekening is te vinden in Tabel 20.

	Elektrisch	Diesel
Afschrijving machines (jaren)	10	10
Investeringskosten machine	€ 300.000,00	€ 300.000,00
Onderhoudskosten		
Investeringskosten batterijpakket	€ 169.000,00	-
Investeringskosten aandrijfsysteem	€ 18.500,00	€ 32.500,00
MIA aftrek	€ 43.875,00	
Energiekosten per jaar	€ 12.040,00	€ 28.060,00
<b>Terugverdientijd</b>	<b>6,9 jaar</b>	

Tabel 6: Samenvatting terugverdientijdsberekening

Uit de tabel blijkt dat onder relatief gunstige randvoorwaarden, de jaarlijkse kosten voor een elektrische graafmachine ca 14.000 EUR per jaar lager kunnen uitvallen dan voor een conventionele graafmachine.

#### Gevoeligheidsanalyse

Twee variabelen welke veel impact hebben op de economische berekening zijn de elektriciteitsprijs en de accuprijs. De elektriciteitsprijs voor grootverbruikers is vanaf ca. 5 cent per kWh, maar dat is exclusief de vergoeding voor de aansluitkosten. Temeer omdat het in het geval van werkzaamheden vaak een tijdelijke aansluiting betreft, kan dit leiden tot een grote toeslag van bijvoorbeeld 10 tot 20 cent per kWh. Dit heeft vanzelfsprekend een significante invloed op de terugverdientijd, die daardoor ook sterk afhangt van de specifieke toepassing van de machine. De terugverdientijd kan in zeer gunstige omstandigheden (accuprijs €250/kWh en elektriciteitsprijs van €0,10/kWh) teruggedrongen worden tot 2,8 jaar, terwijl deze in zeer ongunstige omstandigheden (accuprijs €500/kWh en elektriciteitsprijs van €0,25/kWh) kan oplopen tot 23 jaar.

#### b. Tractor



Figuur 12: Valtra N154

De tractor die tijdens dit onderzoek geanalyseerd is betreft een Valtra N154 tractor met Agco Power 49 AWF dieselmotor, welke gedurende een periode van 25 dagen is gevolgd met een totale meettijd van 44 uur.

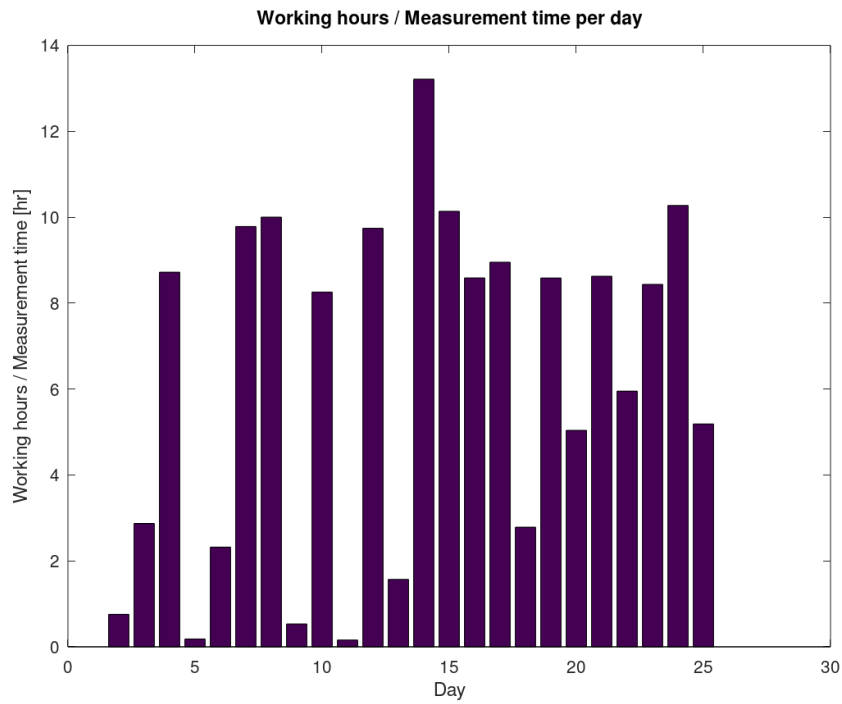
### 1. Energieverbruik en gebruiksprofiel

Het energieverbruik en gebruiksprofiel is in de Figuren 13 t/m 16 weergegeven. Figuur 13 laat het dagelijkse energieverbruik van de Valtra N154 tractor zien. De figuur laat zien dat de dagelijkse energievraag zeer fluctueert van dag tot dag, met pieken tussen de 300 en 350 kWh die echter zelden voorkomen. De laatste 10 dagen van de meting ligt het energieverbruik tussen de 50 en 200 kWh per dag.

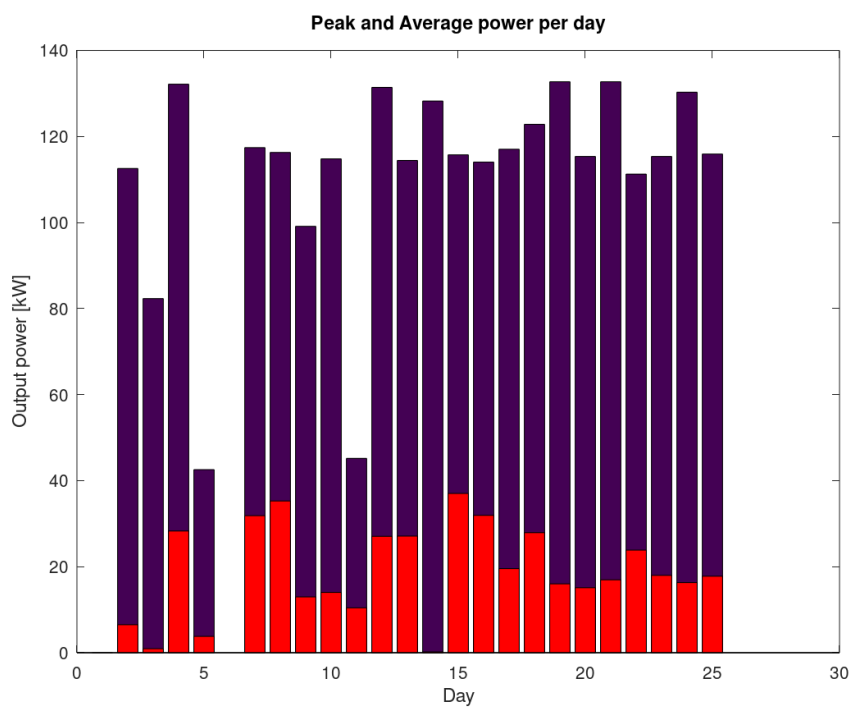
Om de specificatie van de totale aandrijflijn te kunnen bepalen wordt ook het piek- en nominaal vermogen van de motor uiteengezet. In Figuur 15 is het piekvermogen en het gemiddelde vermogen per dag uitgezet. Uit deze figuur wordt duidelijk dat het piekvermogen de meeste dagen benaderd wordt, terwijl het gemiddelde vermogen relatief laag is met een zwaartepunt tussen de 20 en 50 kW (zie Figuur 16). Zoals ook bij de graafmachine het geval was wordt het uit de data niet duidelijk hoe lang pieken duren, wat benodigd is om de juiste motor te selecteren.



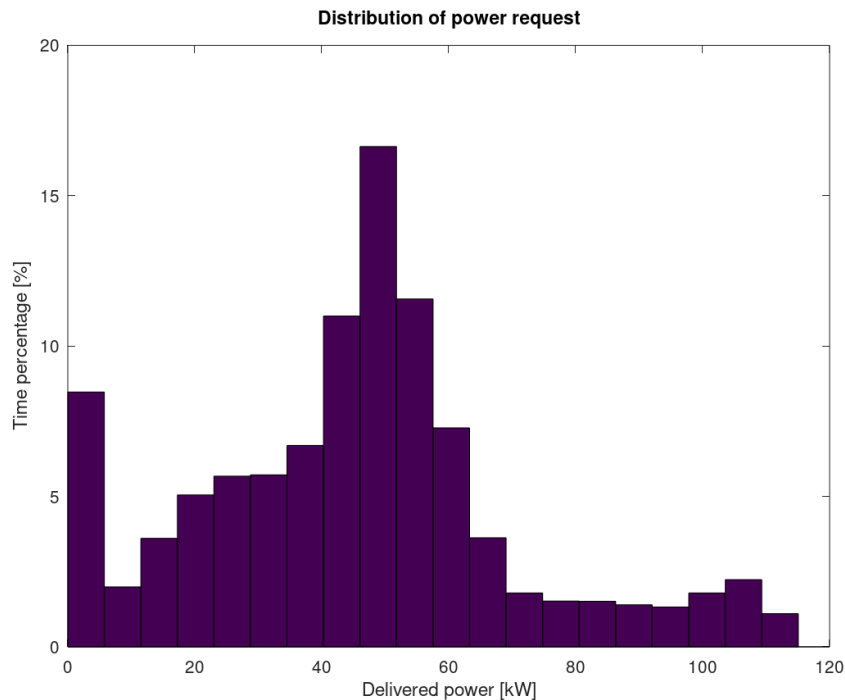
Figuur 13: Dagelijkse energieconsumptie van de Valtra N154 tractor (in kWh)



Figuur 14: Dagelijkse werkuren van de Valtra N154 tractor (in uren)



Figuur 15: Dagelijkse Piek (blauw) - en gemiddelde (rood) vermogensvraag van de Valtra N154 tractor (in kW)



Figuur 16: Vermogensverdeling van de Valtra N154 tractor (in kW) vs. tijd

## 2. Aandrijfsysteem

### Batterijpakket

Uit de analyse van het dagelijkse energieverbruik volgt dat de dagelijkse energievraag grofweg varieert tussen de 50 en 350 kWh. Een batterijpakket dat in alle omstandigheden een volledige dag onafgebroken werk moet garanderen heeft dus ruim 350 kWh aan accucapaciteit nodig. Gezien deze capaciteitsvraag zelden bereikt wordt zou het onlogisch zijn om een dergelijke grootte pakket te integreren. Uit de data volgt dat de gemiddelde energiebehoefte per dag ca. 185 kWh is (als de dagen waarin de machine niet of nauwelijks wordt gebruikt weggelaten worden). Ter vergelijking wordt de haalbaarheid van een pakket dat in een dagelijkse energiebehoefte van ruim 350 en van ca. 185 kWh kan voorzien onderzocht.

Met standaardbatterijmodules op basis van de hoogste capaciteit Lithium-Ion Nikkel Kobalt Aluminium (NCA) technologie kan een batterijpakket samengesteld worden met een nominaal voltage van ca. 400 Volt en een bruikbare capaciteit van ruim 350 kWh. Een batterijpakket met een bruikbare capaciteit van 362 kWh heeft een gewicht van ca. 2302 kg en volume van ca. 1400 L.<sup>16</sup> De volledige specificaties zijn weergegeven in Tabel 4.<sup>17</sup>

Met een standaard driefasen krachtstroomaansluiting op 400V van 3x63A is een pakket van 200 kWh binnen 4 uur op te laden, terwijl een 400 kWh pakket eenvoudig gedurende de

<sup>16</sup> Specificaties op basis van een pakket samengesteld uit 50,4V 100Ah SPIKE Advanced modules van SPIKE Technologies B.V. met 2900 mAh 18650 batterijcellen (zie [www.spike.global](http://www.spike.global)).

<sup>17</sup> Om de levensduur van batterijpakketten te verlengen wordt aangeraden niet alle capaciteit van de pakketten volledig te benutten. Hier wordt uitgegaan van een bruikbare capaciteit van ca. 90%

nacht is op te laden. Daarnaast is er op locaties waar een tractor gebruikt wordt over het algemeen meer elektriciteit voorhanden, waardoor snellaadinfrastructuur ook gemakkelijker te realiseren is. Om die reden zou een pakket met een bruikbare capaciteit van 180 kWh (en een nominale capaciteit van ca. 200 kWh) sneller voldoen

	Specificaties batterijpakket met bruikbare capaciteit van ca. 360 kWh	Specificaties batterijpakket met bruikbare capaciteit van ca. 180 kWh
Nominal capacity	998Ah / 402,2kWh	499Ah / 201,1kWh
Usable capacity	~362 kWh	~181 kWh
Nominal voltage	403,2V	403,2V
Minimal voltage	280V	280V
Maximum voltage	470,4V	470,4V
Operating voltage range	336V - 459,2V	336V - 459,2V
Max. continuous discharge	963A / 388,1kW	481A / 194,0kW
Peak discharge	2.888A / 1.164,2kW	1.444A / 582,1kW
Standard charge	481A	241A
Max. charge	962,5A	481,25A
Charge temperature	0 to 45°C	0 to 45°C
Discharge temperature	-20 to 60°C	-20 to 60°C
Expected cycle life	1500-2000	1500-2000
Weight	2302,4 kg	1151 kg
Volume	1552, L	776 L

Tabel 7: Specificaties batterijpakket t.b.v. tractor met een bruikbare capaciteit van ca. 360 en 180 kWh

### Overige aandrijfcomponenten

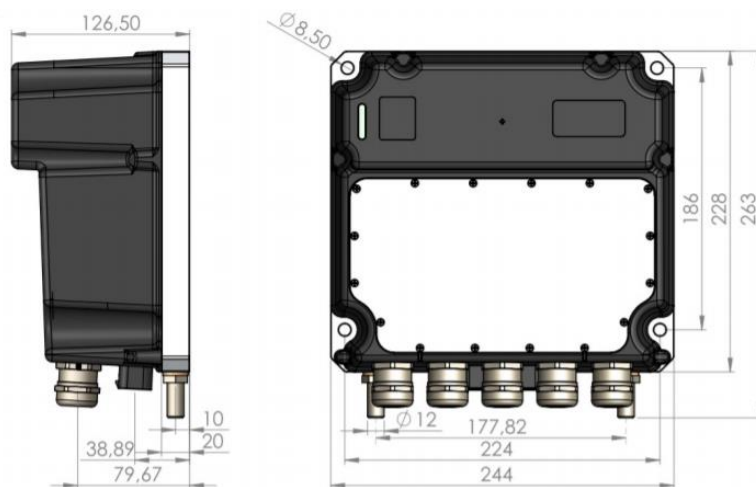
Om de specificaties van de overige aandrijfcomponenten, de elektromotor en motorcontroller, te bepalen, is de dagelijkse vermogensvraag van belang. Op basis van de dagelijkse vermogensvraag zou een aandrijflijn met een elektromotor en motorcontroller die nominaal 40 kW kunnen leveren over het algemeen altijd moeten voldoen, ervan uitgaande dat piekvermogens tot het dubbele vermogen mogelijk zijn. Net zoals bij de graafmachine is uit de data is echter niet te achterhalen hoe lang de piekvermogens worden aangehouden. Voor deze analyse wordt ervan uitgegaan dat dat niet meer dan 1 minuut achtereenvolgens het geval is.

Één van de motoren die ten minste voldoet aan de gestelde specificaties is de Avid AF130 motor met een nominaal vermogen van 64 kW en een piekvermogen van 145 kW. Het volume van deze motor is met 7,7 liter zeer compact en het gewicht van 30,5 kg is ook nagenoeg verwaarloosbaar.

Continuous Power [kW]	64
Peak Power [kW]	145
Nominal Voltage [V]	T/m 800
Weight [kg]	30,5
Diameter [mm]	300
Axial Length [mm]	110
Volume [L]	7,7
Estimated costs [€]	7.500,-

Tabel 8: Specificaties Avid AF130 motor

Een bijbehorende motorcontroller is de EMDrive H300.<sup>18</sup> De specificaties zijn weergegeven in Tabel 9.

Figuur 17: EMDrive H300 motorcontroller<sup>18</sup>

Continuous Power [kW]	135
Peak Power [kW]	200
Nominal Voltage [V]	T/m 450
Weight [kg]	7,5
Length [mm]	263
Width [mm]	244
Height [mm]	127
Volume [L]	8,1
Estimated costs (€)	4.500,-

Tabel 9: Specificaties EMDrive H300 motorcontroller

### Beschikbare ruimte

De beschikbare ruimte voor het aandrijfsysteem is zeer globaal afgeschat door het volume en gewicht te bepalen dat grofweg vrijkomt door de verbrandingsmotor en brandstoftank weg te halen.

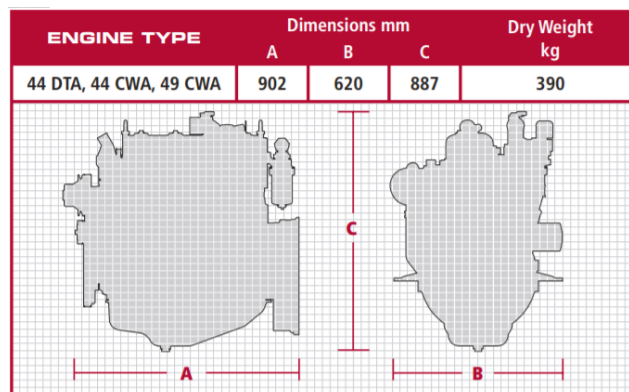
Het volume dat vrijkomt door verwijdering van de verbrandingsmotor is bepaald op basis van Figuur 18<sup>19</sup>, wat neerkomt op 496 L. Het gewicht van de motor is 390 kg.

<sup>18</sup> emDrive H300 BLDC motor controller Datasheet V1.7 (retrieved from [https://www.emdrive-mobility.com/wp-content/uploads/2019/08/emDrive\\_H300\\_datasheet\\_V1\\_7.pdf](https://www.emdrive-mobility.com/wp-content/uploads/2019/08/emDrive_H300_datasheet_V1_7.pdf))

<sup>19</sup> 3rd Generation Series 4-Cylinder Diesel Engine Specification Sheet (retrieved from <http://www.deag.ch/de/assets/contentfiles/downloads/SISU%20Datenblatt%204-Zyl.pdf>)

Het volume dat vrijkomt door verwijdering van de brandstoftank is bepaald door de tankinhoud van de graafmachine te bepalen, wat neerkomt op 315 L<sup>20</sup>. Op basis van de soortelijke massa van diesel geeft dit een gewichtsbesparing van 265 kg.

Geconcludeerd kan worden dat zowel qua gewicht als volume een batterijpakket met een bruikbare capaciteit van 360 kWh niet in te passen is. Een pakket met een bruikbare capaciteit van ca. 180 kWh zou qua volume goed moeten passen, maar voegt wel ruim 500 kg aan gewicht toe.



Figuur 18: Dimensies AGO Power Dieselmotor 49<sup>19</sup>

Massa [kg]	Diesel	Elektrisch (360 kWh)	Elektrisch (180 kWh)
Dieselmotor [kg]	390		
Brandstoftank [kg]	265		
Elektromotor [kg]		30,5	30,5
Motorcontroller [kg]		7,5	7,5
Batterijpakket [kg]		2302	1151
<b>Totale Massa</b>	<b>655</b>	<b>2340</b>	<b>1189</b>
<b>Volume [L]</b>	<b>Diesel</b>	<b>Elektrisch (320 kWh)</b>	<b>Elektrisch (160 kWh)</b>
Dieselmotor [L]	496		
Brandstoftank [L]	315		
Elektromotor [L]		7,7	7,7
Motorcontroller [L]		8,1	8,1
Batterijpakket [L]		1552	776
<b>Totaal volume [L]</b>	<b>811</b>	<b>1567,8</b>	<b>791,8</b>

Tabel 10: Vergelijking volume en gewicht van diesel en elektrische tractor

### 3. Besparingspotentieel

Om het besparingspotentieel te berekenen wordt uitgegaan van de gemiddelde energiebehoefte over de meetperiode (185,2 kWh). Hierbij zijn de dagen waarin de machine

<sup>20</sup> Technical Specifications N Series / 115 - 185 hp (retrieved from [http://www.nakanishi-shoji.co.jp/agco\\_valtra/Valtra\\_PDF/N4\\_specifications\\_en.pdf](http://www.nakanishi-shoji.co.jp/agco_valtra/Valtra_PDF/N4_specifications_en.pdf))

niet of nauwelijks gebruikt werd niet meegenomen. Er wordt aangenomen dat de batterijcapaciteit precies in de gemiddelde dagelijkse energiebehoefte kan voldoen. Alle uitgangspunten zijn hieronder samengevat.

- Gemiddeld dagelijks elektriciteitsverbruik is 185,2 kWh
- Efficiëntie dieselmotor is 30%. Gemiddeld dagelijks dieselverbruik is 49,6 liter.
- Kosten elektriciteit bedragen €0,14 per kWh
- Kosten diesel bedragen €1,22 per liter<sup>21</sup>
- Aantal draaidagen per jaar is 200
- All-in prijs van batterijpakket is €350 per kWh
- Grootte batterijpakket is gelijk aan gemiddeld elektriciteitsverbruik
- Levensduur batterijpakket en machine is 10 jaar
- Levensduur dieselmachine is 10 jaar
- Onderhoudskosten zijn gelijk
- Milieu-investeringsaftrek (MIA) regeling wordt toegepast uitgaande van 25% fiscale winstbelasting
- Kosten aandrijflijn elektrisch zijn gelijk aan kosten dieselmotor
- Financieringskosten van de meerinvestering wordt niet meegenomen, daar wordt gesteld dat deze gecompenseerd wordt met de aftrekvoordelen van de VAMIL-regeling.

Met bovengenoemde uitgangspunten kan de terugverdientijd berekend worden, welke uitkomt op gemiddeld 4,3 jaar. Een samenvatting van de berekening is te vinden in Tabel 20.

	Elektrisch	Diesel
Afschrijving machines (jaren)	10	10
Investeringskosten machine	€ 150.000,00	€ 150.000,00
Onderhoudskosten	€ 0,00	€ 0,00
Investeringskosten batterijpakket	€ 70.350,00	
Investeringskosten aandrijfsysteem	€ 12.000,00	€ 12.000,00
MIA aftrek	€ 20.911,50	
Energiekosten per jaar	€ 5.180,00	€ 12.102,40
<b>Terugverdientijd (in jaren)</b>	<b>7,1</b>	

Tabel 11: Samenvatting terugverdientijdsberekening

Uit de tabel blijkt dat onder relatief gunstige randvoorwaarden, de jaarlijkse kosten voor een elektrische tractor ca 7.000 EUR per jaar lager kunnen uitvallen dan voor een conventionele graafmachine.

#### Gevoeligheidsanalyse

Zoals ook het geval bij de graafmachine is ook in het geval van de tractor de economische terugverdientijd sterk afhankelijk van de elektriciteitsprijs en accuprijs. In het geval van een

<sup>21</sup> EVOFENEDEX (retrieved from <https://www.evofenedex.nl/kennis/vervoer/dieselprijs>)



tractor zal de elektriciteitsprijs minder hoog liggen dan in het geval van de graafmachine, daar dit vaak grootverbruikers betreft en er geen tijdelijke aansluiting aangelegd hoeft te worden. Daar staat tegenover dat de inzet van tractoren wel sterk kan variëren, zoals ook in de dagelijkse energiebehoeftegrafiek naar voren komt.

## 4. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

---

Uit deze analyse volgt dat een batterijpakket en aandrijfsysteem waarmee in de gemiddelde dagelijkse energievraag kan worden voldaan voor beide machines technisch mogelijk is en economisch een aantrekkelijk alternatief kan bieden. Zowel het batterijpakket als de aandrijflijn is inpasbaar in het beschikbare volume en zal niet of nauwelijks leiden tot een toename van gewicht, terwijl de terugverdientijd met respectievelijk 6,9 en 7,1 jaar economisch interessant kan zijn. Deze terugverdientijd is echter sterk afhankelijk van de dagelijkse energiebehoefte, elektriciteitsprijs en accuprijs, welke per specifieke toepassing aanzienlijk kan verschillen en daarmee zowel een stuk lager of hoger kan uitvallen. Daarnaast is ook de hoogte van de winst belangrijk voor de toepasbaarheid van de MIA en VAMIL regelingen.

Het doel van dit onderzoek was echter om een globale inschatting te maken voor twee specifieke machines. Daarnaast zullen huidige ontwikkelingen als de toenemende klimaatproblematiek en stikstofcrisis naar verwachting leiden tot meer stimuleringsmaatregelen ten behoeve van elektrisch materiaal, waardoor deze vraag zal stijgen. In combinatie met de verwachte prijsdaling van batterijpakketten zal de terugverdientijd daardoor verder afnemen, terwijl investeringen in diesel aangedreven voertuigen steeds risicovoller worden.

De grootste technische en economische uitdaging in het elektrificeren van bouwmaterialen zit in de beschikbaarheid van voldoende laadinfrastructuur op de bouwplaatsen om de elektrische bouwmachines tussendoor of in de nacht weer op te laden. Zeker gezien de grootte van de batterijpakketten is er voldoende krachtstroom noodzakelijk die niet op alle bouwplaatsen voorhanden is. Dit volgde ook uit de recente studie van Natuur & Milieu naar de belemmeringen bij de inzet van elektrische mobiele werktuigen.<sup>22</sup>

Uit de meetdata analyse van de twee onderzochte bouwmachines blijkt daarnaast dat de dagelijkse energiebehoefte zeer verschilt van dag tot dag. Bij de graafmachine ligt het zwaartepunt van de energieconsumptie rond de 300 kWh met pieken tot ruim 700 kWh per dag. De gemiddelde energieconsumptie is 430 kWh per dag. Voor de tractor ligt het zwaartepunt rond de 150 kWh per dag met pieken tot 400 kWh met een gemiddelde energieconsumptie van 185 kWh. Om elektrisch aangedreven materieel zo effectief en efficiënt mogelijk in te zetten is het echter van belang dat er een gedragsverandering plaatsvindt waarin het gebruik dagelijks voorspelbaar is, zodat hier de juiste voorzorgsmaatregelen voor getroffen kunnen worden.

In een vervolgstudie met verschillende stakeholders kan concreter invulling gegeven worden aan de mogelijkheid om deze voorzorgsmaatregelen te treffen. Hier gaat de volgende sectie op in.

---

<sup>22</sup> Belemmeringen bij de inzet van elektrische mobiele werktuigen. Natuur & Milieu en BMWT, september 2019

## 5. VERVOLG

---

De eerste fase stond voornamelijk in het teken van het onderzoeken van de haalbaarheid en potentie van een elektrisch aandrijfsysteem voor een tweetal bouwmachines. Nadat deze potentie is aangetoond zou een volgende fase gestart kunnen worden waarin concreet invulling gegeven wordt aan het ontwerp van deze bouwmachines en uiteindelijk de bouw van een prototype. Onderstaande fasen geven de werkzaamheden aan die hierin noodzakelijk zijn.

### Fase 2: Invulling

Indien de potentie van elektrificatie is aangetoond in Fase 1, kan er een vervolgfase worden opgezet waar een concrete invulling gegeven kan worden aan het ontwerp van een elektrische bouwmaschine. Dit houdt in dat er een op basis van de gevonden specificaties in Fase 1 gekeken wordt of hieraan voldaan kan worden: a) op basis van huidige voertuigontwerpen, b) of met een nieuw voertuigontwerp.

#### 1. Stakeholder consultatie

Marktpartijen worden geconsulteerd voor het ophalen van gebruikseisen en mogelijkheden voor het laden van de accu's. Deze eisen omvatten o.a.:

- minimale en maximale gebruiksduur voor verschillende typen projecten en gebruiker
- Mogelijkheid tot tussendoor laden en laden bij nacht
- Beschikbaarheid elektriciteit (uit grid) voor het opladen in overleg met netwerkoperators
- Eventuele optie voor een accuwisselsysteem
- Laadvermogens, zwaarte aansluiting en elektriciteitsprijs
- Middels een tussentijdse Powerpoint presentatie zullen de eerste studieresultaten gepresenteerd worden. De resultaten zullen samen met de marktpartijen gereviewed worden
- Globale specificatie van de infrastructuur en laadstrategie op de bouwplaats (laadvermogen, beschikbaarheid netstroom op de bouwplaats)

#### 2. Uitwerking ontwerp

Uitgaande van technologische mogelijkheden en gebruikseisen wordt gekeken of aan deze specificaties kan worden voldoen en op welke manier dit mogelijk gemaakt kan worden. Hierin wordt er ook een samenwerking gezocht met de afdeling TNO Powertrains om de haalbaarheid van voertuigaanpassingen te onderzoeken. Hiertoe worden er verschillende concepten verder uitgewerkt: a) volledig elektrisch, b) beperkt elektrisch bijvoorbeeld volledige idle shut off, en eventueel peak shaving (kleinere motor).

#### 3. Uitwerking kosten – en baten

Op basis van de uitgewerkte ontwerpen en mogelijkheden voor laden van accu's wordt een nieuwe kosten – en batenanalyse gemaakt die inzicht verschaft in de investeringskansen.

### Fase 3: Prototypebouw / Pilot

Indien Fase 2 tot een succesvol einde wordt gebracht zal in samenwerking met marktpartijen gekeken worden of gezamenlijk overgegaan kan worden tot de bouw van een prototype en opzet van een pilot waarin dit prototype in de praktijk getest kan worden. De activiteiten van deze fase zullen gedefinieerd worden in de loop van Fase 2.