

TRANSENERGY

Lessen uit de praktijk van emissieloze
bouwplaatsen



TNO-2026-17041 – 26 juni 2026

TRANSENERGY

Lessen uit de praktijk van emissieloze bouwplaatsen

Auteurs	Pim van Mensch, Annette Rondaij
Exemplaar nummer	TNO Publiek
Aantal pagina's	119 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	2
Sponsor	TKI Dinalog
Project naam	TRANSENERGY
Project nummer	060.56353

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.

© 2026 TNO

Samenvatting

Het project TRANSENERGY onderzoekt hoe zero-emissie (ZE) bouwplaatsen in de praktijk kunnen functioneren en welke randvoorwaarden nodig zijn om emissieloos bouwen betrouwbaar en op schaal toe te passen. De aanleiding ligt in de toenemende inzet van ZE-materieel, de ambities uit de Routekaart Schoon en Emissieloos Bouwen (SEB) en de groeiende vraag naar tijdige en robuuste energievoorzieningen op bouwplaatsen. De energietransitie op de bouwplaats gaat gepaard met uitdagingen rondom de vermogensvraag, laadinfrastructuur, logistiek, ketentransport en organisatorische afstemming. TRANSENERGY richt zich daarom op het ontwikkelen van inzicht in hoe keuzes rondom energievoorziening, ZE-materieel en logistiek in de praktijk worden gemaakt, wat deze keuzes beïnvloedt, en wat het effect hiervan is op de realisatie van een ZE-bouwplaats.

Om deze vragen te beantwoorden zijn vier praktijkcases onderzocht: Dijkversterking Mekante Diek, verhardingswerkzaamheden in de gemeente Amsterdam, het woonrijp maken van een nieuwe wijk in de gemeente Harderwijk en spoorbouwwerkzaamheden van ProRail. Dit is aangevuld met externe cases, een cross-case analyse van tachtig bouwprojecten en interviews met opdrachtnemers, opdrachtgevers en energieleveranciers. Hiermee ontstaat een breed beeld van zowel technische prestaties als organisatorische randvoorwaarden.

TRANSENERGY wordt gefinancierd door TKI Dinalog en is uitgevoerd door een breed en divers consortium, waarbij publieke en private partijen uit de bouwsector samenwerken. Het consortium, onder penvoering van TNO, omvat opdrachtgevers (gemeente Amsterdam, gemeente Harderwijk en ProRail), uitvoerende aannemers (Boskalis, Ploegam, Van Gelder en Van Werven), branche-organisaties (Cumela, TLN en Bouwend Nederland), marktpartijen gespecialiseerd in het ontwerpen en/of leveren van energievoorzieningen en/of emissieloos bouw materieel (VONK, Staal en Vlot Smart Solutions). Daarnaast zijn de netbeheerders vertegenwoordigd via ElaadNL (kennis- en innovatiecentrum op het gebied van slimme laadinfrastructuur in Nederland) en is Skoon Energy betrokken als softwareleverancier die zich richt op het verbinden van vraag en aanbod van mobiele energieoplossingen.

Het onderzoek laat zien dat het effect van keuzes voor energievoorziening, materieelinzet en vervoer sterk afhankelijk is van het projecttype, de beschikbaarheid van infrastructuur en de mate waarin deze keuzes vroeg (ruim voor de start van de uitvoering; indicatief ten minste een halfjaar van tevoren, afhankelijk van de complexiteit van het project) in het proces worden gemaakt. In de dijkversterkingscase blijkt dat de keuze voor een snellaadplein en een wisselaccu-logistiek systeem leidt tot hoge continuïteit, minimale stilstand en een robuuste energievoorziening. In Harderwijk blijkt dat de keuze van de gemeente om zelf een laadhub te faciliteren direct bepalend is voor het haalbaar maken van een volledige ZE-bouwplaats. Tegelijkertijd maakt de case Amsterdam duidelijk dat het tijdig concretiseren van de vermogensvraag en laadinfrastructuur randvoorwaardelijk is om ZE-ambities in de uitvoering te realiseren. De ProRail-case toont dat de keuze voor gebruik van tractiestroom invloed heeft op energielogistiek, maar ook dat complexe organisatorische en contractuele factoren de uitvoerbaarheid mede bepalen.

Uit alle cases blijkt dat keuzes rondom energievoorziening, laadstrategie, inzetprofielen, plaatsing van laadpunten en transport van accu's direct invloed hebben op de haalbaarheid, betrouwbaarheid en efficiëntie van een ZE-bouwplaats. De manier waarop keuzes tot stand komen wordt vooral beïnvloed door de mate van voorbereiding, de beschikbaarheid van infrastructuur, doorlooptijden voor netaansluitingen, samenwerking tussen opdrachtgever en opdrachtnemer, en de beschikbaarheid van data. Wanneer keuzes vroeg worden gemaakt en randvoorwaarden zijn geborgd, zijn de effecten positief: hogere inzetbaarheid, minder stilstand, voorspelbare energievoorziening en realistische planning. Worden keuzes laat gemaakt, dan ontstaat vaak terugval op conventioneel materieel of inefficiënte laadsituaties. Dit is het gevolg van het ontbreken van voldoende voorbereidingstijd om netaansluitingen te realiseren, laadinfrastructuur te organiseren en de bijbehorende (logistieke) organisatie goed in te richten.

Belangrijkste bevindingen

Het onderzoek laat zien dat ZE-bouwplaatsen technisch haalbaar en operationeel uitvoerbaar zijn, ook bij zware inzet van materieel. In de praktijk blijkt dat de grootste uitdagingen niet liggen in de techniek, maar vooral in de organisatie, voorbereiding en tijdige beschikbaarheid van energie op projectlocaties. Het succes van emissieloos bouwen wordt bepaald door de mate waarin randvoorwaarden, zoals inzicht in vermogensvraag, laadvoorzieningen en logistiek, vroegtijdig worden ingericht. In projecten waar deze aspecten laat of onvoldoende zijn geborgd blijken ZE-ambities moeilijk te realiseren.

Voor de realisatie van ZE-bouwplaatsen zijn de volgende aandachtspunten bepalend:

- Sleutelrol voor de opdrachtgever in de organisatie van randvoorwaarden
- Succes valt of staat met vroegtijdige energieplanning
- Verbeterde monitoring en standaardisatie nodig voor opschaling
- Nieuwe werkmethoden en kennisontwikkeling noodzakelijk als voorwaarde voor implementatie.

Een terugkerend inzicht is dat de huidige praktijk, waarin de aannemer primair verantwoordelijk is voor de energievoorziening, vaak onvoldoende aansluit bij de tijd die nodig is om netaansluitingen, laadcapaciteit of alternatieve infrastructuur te realiseren. Omdat de aannemer doorgaans pas in de uitvoeringsfase in beeld komt, leidt dit tot aanzienlijke knelpunten in de uitvoering. Daarom is een rolverschuiving, of een gedeelde verantwoordelijkheid, wenselijk: opdrachtgevers kunnen een actievere en, waar nodig, faciliterende rol innemen bij het organiseren van energievoorzieningen, bijvoorbeeld door tijdig laadhubs of toegang tot bestaande infrastructuur te regelen. Indien de aannemer voldoende tijd heeft om dit zelfstandig te organiseren, kan de faciliterende rol van de opdrachtgever beperkter zijn of achterwege blijven.

Daarnaast blijkt uit de cases dat betrouwbare monitoringsdata van essentieel belang is. Hiermee kan optimalisatie van inzet, laadstrategie en dimensionering van infrastructuur plaatsvinden. Projecten met goede datakwaliteit, zoals de dijkversterkingscase, laten zien hoeveel inzicht dat oplevert in laadgedrag, accugebruik en benuttingsgraad. Voor opschaling van ZE-bouwen is het daarom van belang om uniforme registratieprotocollen en dashboards te hanteren.

De cross-case analyse bevestigt dat de energievraag en het benodigde laadvermogen sterk verschillen per projecttype. Lichte GWW-projecten kunnen vaak uit met een aansluiting van 55 kW (3x80A).

Zware buitenstedelijke GWW-projecten, zoals railbouw en kust- en oeverwerken, hebben daarentegen veel hogere gemiddelde energiebehoeften in de orde van 1-10 MWh per dag. Voor deze projecten zijn doorgaans aansluitingen van meer dan 160 kW nodig, al dan niet aangevuld met bufferaccu's en slim laadmanagement. Dit onderstreept de noodzaak van projecttype-specifieke energieconfiguraties.

Op basis van deze inzichten wordt aanbevolen om emissieloos bouwen concreet en toetsbaar te verankeren in de vroege projectfase. Hierbij helpt het om bijvoorbeeld vóór de aanbesteding energiescans uit te voeren die inzicht geven in de verwachte energievraag van het project en het beschikbare vermogen van laadaansluitingen in de omgeving van de bouwplaats. Hierbij is het nuttig om bestaande aansluitingen in de omgeving zo goed als mogelijk te benutten, al dan niet via flexibele contracten met stroomleveranciers (zoals tijdgebonden contracten). Door deze randvoorwaarden vroeg te bepalen, wordt voorkomen dat projecten tijdens de uitvoering alsnog moeten terugvallen op conventioneel materieel of noodoplossingen. Daarnaast is het belangrijk dat opdrachtgevers duidelijke en realistische ZE-uitvragen formuleren en waar nodig zekerheid bieden via meerjarige inzetgaranties of gedeeltelijke vergoeding van meerkosten. Dit verhoogt de investeringsbereidheid bij aannemers. Ook is het wenselijk dat de energievoorziening niet langer uitsluitend als verantwoordelijkheid van de aannemer wordt gezien. Opdrachtgevers kunnen hierin waar nodig een actieve en faciliterende rol spelen, bijvoorbeeld door tijdelijke laadhubs te realiseren of afstemming met netbeheerders/stroomleveranciers te organiseren. Verder is een aanzienlijke verbetering van monitoring en datakwaliteit nodig. Zonder betrouwbare en gestandaardiseerde registratie van energiegebruik, laadgedrag en inzetdata blijven optimalisatie en opschaling beperkt. Ook wordt standaardisatie van laadinfrastructuur en ZE-materieel aanbevolen om compatibiliteitsproblemen te verminderen en kosten te verlagen. Tot slot vraagt de overgang naar emissieloos bouwen om aangepaste werkmethoden. Planning, fasering en logistiek moeten rekening houden met laadprocessen, beschikbaar laadvermogen en transport van accu's. Strategisch geplaatste laadpunten dicht bij de bouwlocatie kunnen stilstand verminderen en productiviteit verhogen. Daarnaast is het belangrijk om te investeren in kennisontwikkeling, training en cultuurverandering binnen organisaties.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1 Inleiding.....	8
2 Conceptueel model	11
3 Case Dijkversterking	13
3.1 Samenvatting	14
3.2 Kenmerken materieel en laadinfrastructuur	15
3.3 Energiegebruik en inzet ZE-materieel.....	18
3.4 Batterijwisselproces.....	26
3.5 Energiegebruik en inzet ZE-trucks.....	28
3.6 Stroomaanbod versus stroomgebruik	36
4 Case Amsterdam	38
4.1 Samenvatting	39
4.2 Aanpak	39
4.3 Bevindingen.....	40
4.4 Conclusies.....	41
4.5 Monitoring bouwproject Hoek van Holland.....	41
5 Case Harderwijk.....	46
5.1 Samenvatting	47
5.2 Data-analyse inzet machines en gebruik laders	48
5.3 Total Cost of Ownership (TCO)-berekening.....	51
5.4 Conclusies.....	53
6 Case ProRail.....	55
6.1 Samenvatting	55
6.2 Specificaties van het elektrisch materieel in Vught	56
6.3 Omschrijving laadinfrastructuur	57
6.4 Ervaringen en leerpunten uit de pilot	58
6.5 Analyse laadgegevens vanuit laadcontainer.....	59
7 Cross-case analyse	63
7.1 Samenvatting	63
7.2 Energie- en vermogensvraag bouwplaatsen.....	63
8 Interviewresultaten.....	70
8.1 Samenvatting	70
8.2 Geïnterviewde partijen.....	71
8.3 Projectkenmerken.....	72
8.4 Barrières.....	73
8.5 Succesfactoren.....	76
8.6 Combinatie van barrières en succesfactoren.....	79
8.7 Conclusies en aanbevelingen.....	84
9 Discussie.....	87
10 Conclusie en aanbevelingen.....	89
Referenties	93

Ondertekening.....	94
--------------------	----

Bijlagen

Bijlage A:	Analyse Laadprofiel ProRail door ElaadNL	95
Bijlage B:	TRANSENERGY Deep Dive door Skoon Energy	98

1 Inleiding

Het project TRANSENERGY onderzoekt hoe zero-emissie bouwplaatsen in praktijk kunnen werken. De motivatie voor TRANSENERGY komt vanuit de doelen en ambities die de Rijksoverheid heeft gesteld om de negatieve impact van het gebruik van bouwmaterieel op natuur, klimaat en gezondheid te verminderen. Om hier richting aan te geven is de Routekaart Schoon en Emissieloos Bouwen (SEB) opgesteld, waarin stappen worden beschreven om de emissies van CO₂, NO_x en fijnstof te reduceren door de inzet van schoner en emissieloos/zero-emissie (ZE) materieel. In praktijk betekent dit dat de overheid, decentrale overheden, maar ook bouwers en aannemers aan de slag moeten om emissieloos werken op de bouwplaats te realiseren. Bij deze groepen leven nog allerlei vragen over hoe aan verschillende randvoorwaarden kan worden voldaan om de inzet van ZE-materieel in de praktijk te realiseren, zoals de beschikbaarheid van emissieloos materieel en de betaalbaarheid van emissieloos bouwen. Ook de energievoorziening is een belangrijke factor. Een grote uitdaging in de elektrificatie van bouwplaatsen ligt in de beschikbaarheid van voldoende laadinfrastructuur op de juiste tijd en plaats [1] [2] [3]. Specifiek ten aanzien van deze factor wil TRANSENERGY ervaring opdoen met verschillende oplossingsrichtingen en inzicht verkrijgen in de factoren die van invloed zijn op de keuzemogelijkheden bij en rond de realisatie van een ZE-bouwplaats. Binnen TRANSENERGY ligt de nadruk van het onderzoek op de typen oplossingen die in de praktijk worden toegepast en daarmee bijdragen aan de realisatie van een ZE bouwplaats. De volgende onderzoeksvraag staat centraal:

“Wat is het effect van verschillende mogelijke (individuele) keuzes in het realiseren van een ZE-bouwplaats in praktijk voor verschillende type bouwplaatsen, met betrekking tot de gerealiseerde energievoorziening, de inzet van ZE-materieel en -vervoer, en hoe komen deze keuzes tot stand, en waardoor worden deze beïnvloed?”

TRANSENERGY gaat daarmee specifiek in op de uitvraag die TKI Dinalog in 2022 deed, namelijk “onderzoek naar energielogistiek op de bouwplaats”¹. Een deel van de schadelijke emissies van stikstof (NO_x) en andere stoffen (CO₂, fijnstof) vindt plaats op bouwplaatsen. Dit komt onder andere door het gebruik van materieel op locatie, maar ook door logistieke activiteiten die samenhangen met het last-mile vervoer van materialen en bouwpersoneel. De inzet van emissiearme en emissieloze werktuigen, voertuigen en vaartuigen gaat de komende jaren verder toenemen. Dit wordt mede mogelijk gemaakt door stimuleringsregelingen, zoals SSEB (Subsidieregeling Schoon en Emissieloos Bouwmaterieel), SEBA (Subsidieregeling Emissieloze Bedrijfsauto's) en AanZET (Aanschafsubsidie Zero-Emissie Trucks), maar wordt deels ook gedreven door eisen vanuit opdrachtgevers. TRANSENERGY richt zich op de steeds urgenter wordende uitdagingen met betrekking tot de energie-infrastructuur. Deze uitdagingen ontstaan doordat er meer ZE-materieel en -voertuigen beschikbaar komen en worden ingezet, wat leidt tot een groeiende energiebehoefte. Om een volledig emissieloze bouwplaats te realiseren, is een andere vorm van energievoorziening op de bouwplaats noodzakelijk. De mogelijkheden en specifieke behoefte hiervoor verschillen per type bouwplaats.

¹ Logistiek op de bouwplaats is meer dan alleen het transport van materiaal (en grond), materieel, mensen en energiedragers van en naar de bouwplaats; het gaat ook over de inzet (planning, besturing en organisatie) van materieel en mensen, en daarmee ook over de planning van de energiebehoefte in tijd.

Een binnenstedelijke nieuwbouwlocatie voor woning- of utiliteitsbouw kent daarin andere mogelijkheden en beperkingen dan bijvoorbeeld een onderhoudsproject in de GWW-sector (Grond-, Weg- en Waterbouw) in het buitengebied. Er zijn verschillende concrete problemen waarvoor oplossingen gevonden moeten worden om uiteindelijk tot emissieloze bouwplaatsen in de praktijk te kunnen komen.

Hierbij gaat het om:

1. De noodzaak van een snelle transitie naar schoon en emissieloos bouwen in relatie tot de urgentie van de bouwopgave;
2. De toenemende concurrentie om netaansluitingen voor de energievoorzieningen op verschillende typen bouwplaatsen, in het licht van de bredere vraag naar meer energievoorzieningen (inclusief de bestaande netcongestie) en de tijd die nodig is om deze knelpunten op te lossen;
3. De nog beperkte ervaring met en aanwezigheid van ZE-materieel op bouwplaatsen;
4. De transport-logistieke vragen rond het mogelijk maken en organiseren van (deels) ZE-transport van en naar bouwplaatsen van materiaal, materieel, mensen en (mogelijke alternatieve) energiedragers.

Aanpak

Om de onderzoeksvraag te beantwoorden, wordt een meervoudige casestudy-aanpak gevolgd. TNO werkt in TRANSENERGY samen met industriepartners, lokale overheden en brancheorganisaties aan het onderzoeken van emissieloze bouwplaatsen. In vier cases wordt samen met de partners binnen TRANSENERGY over een langere periode data verzameld over innovatieve manieren van energievoorziening op bouwplaatsen waar (gedeeltelijk) zero-emissie wordt gebouwd. Naast de vier cases worden er ook externe cases bestudeerd. Voor de externe cases wordt gebruikgemaakt van reeds verzamelde data uit bestaande rapportages en interviews, om per case inzicht te krijgen in de kenmerken, het ontwerp en de uitkomsten. In de externe cases wordt uitsluitend gebruikgemaakt van bestaande informatie; er wordt geen nieuwe (meet-)data verzameld. De data en informatie die voor de cases is verzameld wordt gebruikt om een cross-case analyse uit te voeren om meer inzicht te geven in welke oplossingen van energievoorziening het beste werken voor verschillende typen bouwplaatsen ten behoeve van zero-emissie bouw. De uitkomsten kunnen door zowel opdrachtgevers als opdrachtnemers worden gebruikt om in een vroeg stadium van een bouwproject verschillende oplossingsrichtingen af te wegen bij het realiseren van een (gedeeltelijke) ZE-bouwplaats.

Hoewel er (op lokale schaal) al veel gebeurt op het gebied van emissieloos bouwen, ontbreekt er nog een duidelijk beeld van de relatie tussen de energiebehoefte en de logistiek² op verschillende typen bouwplaatsen. Dit inzicht is essentieel om opschaalbare concepten te ontwikkelen die bijdragen aan (deels) emissieloze bouwplaatsen. De opschaalbaarheid neemt aanzienlijk toe wanneer bekend is welke overeenkomsten bepalend zijn voor een efficiënte organisatie en inzet van energievoorzieningen bij diverse bouwprojecten. Binnen TRANSENERGY worden daarom praktijkinzichten verkregen door op geselecteerde locaties te experimenteren met de inzet van emissieloos materieel en/of alternatieve laadmogelijkheden om in de (toekomstige) energiebehoefte op de bouwplaats te kunnen voorzien. Naast deze case studies wordt aanvullende informatie en praktijkervaring uit externe cases verzameld via interviews en desk research.

² Logistiek op de bouwplaats is meer dan alleen het transport van materiaal (en grond), materieel, mensen en energiedragers van en naar de bouwplaats; het gaat ook over de inzet (planning, besturing en organisatie) van materieel en mensen en daarmee ook over de planning van de energiebehoefte in tijd.

Op basis hiervan vindt een overkoepelende analyse plaats om te bepalen wat wel en niet werkt rondom energievoorzieningen voor (deels) emissieloze bouwplaatsen en hoe dit verschilt per type bouwplaats. Het doel is om gegeneraliseerde kennis te ontwikkelen, met oog voor de diversiteit van bouwprojecten. Deze inzichten zijn ook relevant voor het programma Schoon en Emissieloos Bouwen, dat partijen ondersteunt bij het maken van de overstap naar emissieloos bouwen.

Met deze activiteiten wil TRANSENERGY bijdragen aan een versnelde opschaling van de inzet van emissieloze mobiele werktuigen en voertuigen.

Het TRANSENERGY-project focust zich op onderzoek naar de energietransitie op de bouwplaats en draagt dus in beperkte mate bij aan het daadwerkelijk realiseren van deze transitie en het behalen van emissiereducties (tijdens de looptijd van het project). De kern van TRANSENERGY is het verzamelen van data en praktijkervaringen rond het realiseren van een emissieloze bouwplaats en het vertalen van deze inzichten naar aanbevelingen voor partijen die deze transitie willen en kunnen versnellen. Binnen TRANSENERGY worden derhalve geen technische oplossingen ontworpen, maar vooral geleerd van praktijkervaringen om de opgedane kennis breed te delen.

Leeswijzer

Dit rapport is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 1 introduceert de aanleiding, doelstelling en onderzoeksaanpak van het project. In hoofdstuk 2 wordt het gehanteerde conceptuele model toegelicht, dat als raamwerk dient voor de analyse van de praktijkcases. De hoofdstukken 3 tot en met 6 beschrijven de onderzochte praktijkcases, inclusief context, onderzoeksvragen en belangrijkste bevindingen. De uitwerking en het detailniveau van de cases verschillen onderling. Dit hangt samen met de aard en complexiteit van de projecten, de fase waarin de cases zich bevonden tijdens het onderzoek, de uiteenlopende onderzoeksvragen en de beschikbaarheid van data. Sommige cases lenen zich voor een meer kwantitatieve en gedetailleerde analyse, terwijl andere cases vooral kwalitatieve inzichten opleveren in processen en organisatorische randvoorwaarden.

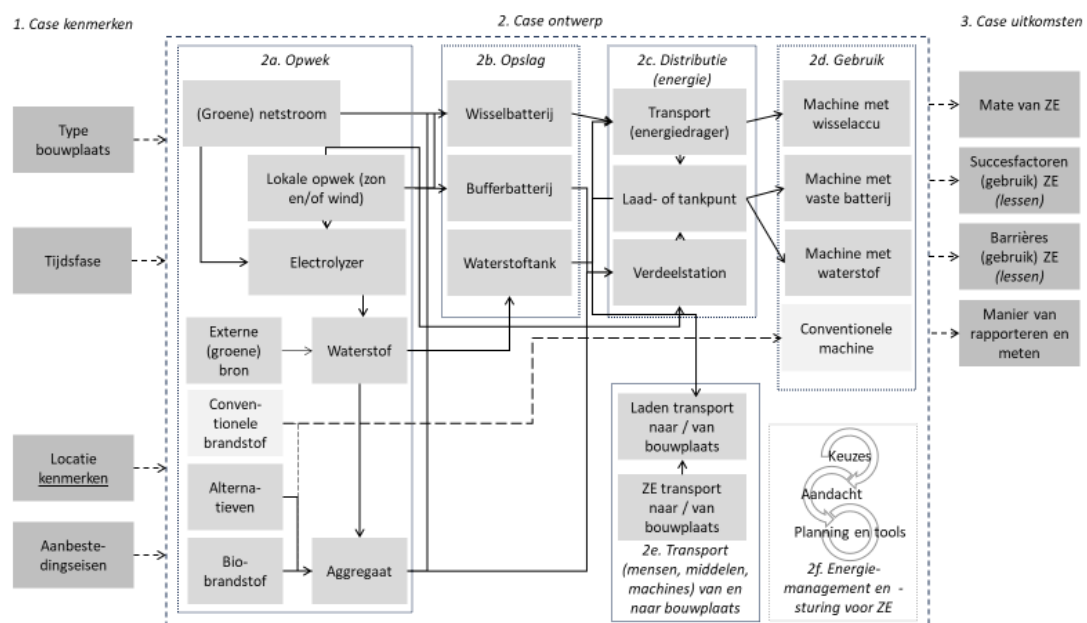
Na de uitwerking van de cases, presenteert hoofdstuk 7 de resultaten van de cross-case analyse, waarin inzichten uit meerdere bouwprojecten worden samengebracht en vergeleken. Hoofdstuk 8 gaat in op de resultaten van interviews met partijen uit de bouwsector en de op basis daarvan geïdentificeerde barrières en succesfactoren. Het rapport sluit af met een discussie (hoofdstuk 9) en conclusies en aanbevelingen (hoofdstuk 10), gericht op opdrachtgevers, opdrachtnemers en beleidsmakers die werken aan de opschaling van emissieloos bouwen.

Dankwoord aan partners

Dit rapport is tot stand gekomen met financiering van TKI Dinalog. Wij danken alle partners binnen het TRANSENERGY-consortium voor het delen van hun praktijkervaringen, data en expertise. Dankzij hun betrokkenheid en de brede samenwerking binnen het TRANSENERGY-consortium heeft het onderzoek kunnen resulteren in praktijkgerichte en breed toepasbare inzichten.

2 Conceptueel model

Het conceptueel model is opgesteld met als doel om de verschillende cases in TRANSENERGY te beschrijven, classificeren en om de cross-case analyse mee uit te voeren. Het is opgesteld op basis van de uitkomsten van het bureauonderzoek naar eerdere studies. In een eerder gepubliceerde rapportage van TRANSENERGY wordt het conceptueel model, inclusief de totstandkoming daarvan, uitgebreid toegelicht (zie [4]). Voor de volledigheid is in dit hoofdstuk een beknopte samenvatting opgenomen.



Figuur 2.1: Conceptueel model

Het conceptueel model (Figuur 2.1) bestaat uit drie verschillende onderdelen:

1. case-kenmerken;
2. case-ontwerp, met onderdelen 2a) opwek, 2b) opslag, 2c) distributie en 2d) gebruik;
3. case-uitkomsten.

Het **case-ontwerp** vormt het grootste deel van het conceptueel model en beschrijft de manier waarop het energieaanbod op de bouwplaats wordt gerealiseerd. Bij emissieloos bouwen is een goede afstemming tussen energievraag en energieaanbod cruciaal. Dit om te voorkomen dat het bouwproject vertraging oploopt door een tekort aan energie, of juist wordt geoverdimensioneerd. De energievraag (ofwel vermogensvraag) tijdens het bouwproject varieert in de tijd en er kunnen hoge pieken optreden. Het energieaanbod is vaak beperkt en niet altijd constant. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn wanneer er geen netaansluiting beschikbaar is en het aanbod afhankelijk is van tijdelijke oplossingen, zoals batterijcontainers, wisselbare accu's of mobiele aggregaten op duurzame brandstoffen. Deze oplossingen hebben elk hun eigen beperkingen in capaciteit en beschikbaarheid, waardoor het energieaanbod fluctueert. Het afstemmen van vraag en aanbod vraagt daarom om maatwerk, waarbij de planning van energie-intensieve activiteiten zorgvuldig moet worden afgestemd met het beschikbare aanbod.

Naast het case-ontwerp bevat het conceptuele model nog twee onderdelen: de case-kenmerken en de case-uitkomsten. De **case-kenmerken** beschrijven de context waarbinnen het bouwproject wordt uitgevoerd, zoals de locatie, de duur en het type werkzaamheden. Deze kenmerken beïnvloeden de mogelijkheden en beperkingen voor emissieloos bouwen. De **case-uitkomsten** beschrijven de geleerde lessen op het gebied van emissieloos bouwen. Daarbij worden succesfactoren en barrières benoemd, evenals praktische inzichten die relevant zijn voor toekomstige projecten. Indien beschikbaar, wordt ook de mate waarin zero-emissie is gerealiseerd beschreven en aangevuld met gegevens uit metingen en monitoring, zoals energiegebruik, emissiereducties en prestaties van toegepaste oplossingen.

3 Case Dijkversterking

De Dijkversterking Tiel-Waardenburg (Mekante Diek) vormt een grootschalige praktijkcase waarin gebruik wordt gemaakt van zero-emissie (ZE) bouwmaterieel, ZE-trucks en een extern snellaadplein (WattHub). Het project is onderdeel van het landelijke Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) en omvat de versterking van de dijk tussen Tiel en Waardenburg (A2) over een lengte van ruim 19 kilometer. De ambitie is om dit traject volledig emissieloos uit te voeren. Daarmee geldt dit project als één van de eerste grootschalige demonstraties van een ZE-bouwplaats met zwaar materieel en een intensieve logistieke operatie.

Omdat de laadinfrastructuur voor zwaar elektrisch materieel in Nederland nog beperkt is, is speciaal voor dit project het grootschalige snellaadplein WattHub ontwikkeld. Dit laadplein is geschikt voor zowel elektrisch bouwmaterieel als ZE-trucks en wordt gevoed met lokaal opgewekte windenergie van Betuwewind. Hoewel WattHub primair is gerealiseerd ten behoeve van de dijkversterking, staat het laadplein ook open voor andere partijen met een hoge elektriciteitsvraag.

In deze case ligt de focus op de relatie tussen energievraag en energieaanbod binnen het dijkversterkingsproject, waarbij specifiek wordt gekeken naar:

- De energievraag van verschillende typen ZE-materieel en ZE-trucks, inclusief de invloed van laadstrategie en inzetprofiel;
- Het energieaanbod via het externe snellaadplein WattHub;
- De energielogistiek, waaronder de inzet van batterijcontainers, wisselaccu's en ZE-transport.

De projectpartners binnen deze case zijn Ploegam en Staad. De overige aannemers binnen het dijkversterkingsproject, evenals WattHub zelf, zijn geen partner binnen TRANSENERGY. De focus van deze case ligt daarom op het ZE-materieel en de vrachtwagens van Ploegam. Het ZE-materieel is geleverd door Staad. Er zijn geen gedetailleerde monitoringsgegevens beschikbaar vanuit het laadplein, waardoor dit geen primaire focus vormt binnen de analyse van deze case. Het laadplein wordt wel beknopt beschreven, en aanvullend wordt voor het energieaanbod aangesloten bij eerder TNO-onderzoek naar WattHub [5].

De primaire focus van dit onderzoek ligt op de energievraag van het ingezette materieel en de voertuigen, en op de wijze waarop de beschikbare energie wordt benut. De analyse bevat monitoringsdata (zoals energiegebruik, state of charge (SOC), laadbeurten en vermogens) van ZE-machines en ZE-trucks alsook een kwalitatieve beschrijving van het batterijwissel- en laadproces.

In dit hoofdstuk worden - na een samenvatting - eerst de kenmerken van het ingezette materieel en de laadinfrastructuur beschreven. Vervolgens wordt het energiegebruik en de inzet van het bouwmaterieel in detail geanalyseerd, inclusief de benutting en laadstrategie van de wisselbare accu's. Daarna wordt het batterijwisselproces kwalitatief toegelicht. Aansluitend wordt ingezoomd op het energiegebruik en de inzet van de ZE-trucks. Tot slot wordt kort ingegaan op de verhouding tussen energieaanbod en energievraag.

3.1 Samenvatting

De case Dijkversterking Tiel-Waardenburg laat zien dat zero-emissie (ZE) bouwplaatsen met zware inzet technisch en operationeel haalbaar zijn. De voorwaarde is wel dat de keuzes voor energievoorziening, logistiek en inzetplanning goed op het projecttype worden afgestemd. Met name bij grootschalige projecten met inzet op diverse locaties, zoals dijkversterkingen, biedt de combinatie van een extern laadplein en wisselaccu-logistiek duidelijke voordelen. Doordat machines niet afhankelijk zijn van vaste laders op de bouwplaats, en batterijcontainers en wisselaccu's naar het werk worden gebracht, neemt de continuïteit van het werk toe en wordt stilstand geminimaliseerd. In de praktijk blijken accu-wissels binnen 10 tot 20 minuten uitvoerbaar. Bovendien worden deze door machinisten in dit project als prettiger ervaren dan laden via een batterijcontainer; dit vanwege de kortere stilstand.

Het externe snellaadplein WattHub fungeert in deze case als essentiële invulling van het energieaanbod. Met DC-laadvermogens tot 400 kW per laadpunt en een koppeling aan lokaal opgewekte wind- en zonne-energie wordt een robuuste energievoorziening gerealiseerd, met een netaansluiting als back-up. De logistieke inrichting speelt een sleutelrol in het functioneren van de ZE-bouwplaats. Het inzetten van trucks voor batterijtransport, met deels vaste dagritmes, verkort stilstand van machines. Binnen de Ploegam/Staad-case blijkt dat het optimalisatiepotentieel vooral ligt in de inzet- en laadstrategie van wisselaccu's, en in mindere mate in de techniek zelf.

De analyse van het energiegebruik van het materieel laat zien dat de DX355LC Electric en de Vario 700 Electric hun accucapaciteit per werkdag het meest intensief benutten, met ontladingen die vaak boven de 50% uitkomen. De DL285 Electric en DX165W Electric kennen daarentegen een gematigder energiegebruik en behouden structureel meer energiereserve. Dit wijst erop dat de accucapaciteiten in het algemeen realistisch zijn afgestemd op het daadwerkelijke gebruik, zij het met duidelijke verschillen in benuttingsgraad tussen machineklassen. De motorbelasting verschilt sterk per machinetype: de DX355LC laat structureel hoge belasting zien, terwijl de Vario 700 juist zeer lage motorbelastingen kent. Deze inzichten bieden aanknopingspunten voor optimalisatie van machinekeuze, accucapaciteit, laadsnelheid en inzetplanning. Elektrisch stationair draaien gebeurt bij sommige machines vaak, maar is energetisch minder problematisch dan bij dieselmaterieel.

De wisselaccu's blijken technisch betrouwbaar en bedrijfszeker te functioneren, met een laadstrategie die primair is gericht op procescontinuïteit en het voorkomen van stilstand. Dit resulteert echter regelmatig in relatief ondiepe laad- en ontlaadcycli, waardoor het beschikbare energiepotentieel niet volledig wordt benut. Optimalisatiemogelijkheden liggen vooral in de inzet- en laadstrategie, bijvoorbeeld door laadmomenten later te plannen, mits dit operationeel en logistiek mogelijk is.

Voor de ZE-trucks laat de uitsplitsing van het energiegebruik zien dat verschillen vooral worden bepaald door inzetprofiel, rijomgeving en rijstijl. Met name de kippers laten een sterk variabel energiegebruik zien. Seizoensinvloeden, vermoedelijk gerelateerd aan het gebruik van verwarming, spelen een belangrijke rol. Uitschieters binnen de vloot hangen samen met zwaardere en meer dynamische inzet.

De inzetpatronen verschillen sterk tussen voertuigen, wat zich vertaalt in variatie in dagafstanden, tripverdelingen, stationaire tijd en het aantal dagelijkse laadmomenten. Sommige trucks laden gemiddeld één keer per dag, terwijl andere tot bijna drie laadbeurten per dag nodig hebben. Het wordt aanbevolen om de impact van intensief gebruik op

batterijgezondheid periodiek te monitoren. Tegelijkertijd geldt dat voertuigen met structureel hoge minimale SOC-waarden (State of Charge, laadstatus van de batterij) en lage laadfrequenties de beschikbare accucapaciteit minder efficiënt benutten.

Indicatief is ingeschat hoeveel energie het kost om de accu-wissels uit te voeren en hoe dit zich verhoudt tot de gebruikte energie van de elektrische bouwmaschinen. Tijdens de optimale ritten, waarbij zeven accu's heen en terug worden vervoerd en de accu's grotendeels ontladen zijn, bedraagt het extra energiegebruik door transport ca. 2%. Bij ritten met minder accu's, die minder ver ontladen zijn, kan dit oplopen tot ca. 10%.

Tot slot bevestigt eerder TNO-onderzoek dat de laadinfrastructuur voor het Mekante Diek-project ruimschoots toereikend is [5]. Ongeveer 90% van de gebruikte elektriciteit is direct afkomstig van het windpark, terwijl slechts 15% van de beschikbare windenergie wordt benut. Ook de tijdsbenutting van het laadplein blijft beperkt, met laadsessies gedurende ca. 30% van de tijd en een daadwerkelijke laadtijd van slechts 13%.

3.2 Kenmerken materieel en laadinfrastructuur

3.2.1 Materieel en machines op de bouwplaats

Tabel 3.1 geeft een overzicht van de gemonitorde elektrische machines en wisselbare accu's, inclusief het gewicht, de batterijconfiguratie en de totale accucapaciteit. De DX165W Electric is een elektrische bandenkraan met een gewicht vanaf 16,5 ton en is uitgerust met één wisselbatterij, wat resulteert in een (bruto) accucapaciteit van ca. 400 kWh. De grotere DX355LC Electric zijn rupskranen met een gewicht van 40 ton. Deze machines maken gebruik van twee wisselbatterijen, wat leidt tot een totale accucapaciteit van 800 kWh bruto. Daarnaast bevat Tabel 3.1 de DL285 Electric. Dit is een elektrische wiellader die is voorzien van een vaste batterij en daardoor geen wisselbatterijen gebruikt, de totale accucapaciteit bedraagt circa 400 kWh. Ook wordt de Vario 700 Electric tractor op banden weergegeven, die gebruikmaakt van een combinatie van één wisselbatterij en een vaste batterij, met een gezamenlijke capaciteit van ongeveer 210 kWh. De afzonderlijke energiesystemen zijn ook opgenomen. Dit zijn de Powerbox 140 en de Powerbox 400. Deze hebben een capaciteit van respectievelijk 140 kWh (benutbare accucapaciteit (netto): 114 kWh) en 400 kWh (benutbare accucapaciteit (netto): 380 kWh). Tot slot zijn de trucks opgenomen: de trekker met oplegger en kipper, beide met een accucapaciteit van 540 kWh (benutbare accucapaciteit (netto): 460 kWh).

Tabel 3.1: Overzicht specificaties elektrisch materieel van Ploegam en Staad.

Naam	Aantal	Type machine	Gewicht	Motor- vermogen	Aantal wisselbatterijen (Powerboxen) per systeem	Vaste accu [kWh]	Bruto totaal capaciteit (afgerond) [kWh]
DX165W Electric	2	Bandenkraan	16,5 ton	104 kW	1	0	400
DX355LC Electric	4	Rupskraan	40 ton	200 kW	2	0	800
DL285 Electric	1	Wiellader	-	140 kW	0	400	400
Vario 700 Electric	4	Tractor op banden	11,2 ton	205 kW	1	70*	210
Powerbox 140	6	Accu	-	-	1	0	140
Powerbox 400	21	Accu	-	-	1	0	400
Truck voor batterij- transport	3**	Trekker met oplegger	Tot 50 ton	330 - 490 kW	0	540	540
Truck 8x4	11	Kipper	Tot 44 ton	350 - 540 kW	0	540	540

* Interne vaste accu wordt normaliter niet aangesproken.

** Eén van de drie trekkers is geleverd door een zusterbedrijf van Ploegam.



Figuur 3.1: Overzicht ZE-kranen en -wielladers. Linksboven: DX165W Electric | Rechtsboven: DX355LC Electric | Linksonder: DL285 Electric.

Bron: [Staad Groep - Elektrische grondverzet- en graafmachines van Electric, een merk van Staad](#)



Figuur 3.2: Afbeelding van een Powerbox 400 (links) en Powerbox 140 (rechts), bron: Staad.



Figuur 3.3 : Elektrische tractor en ZE-trucks van Ploegam. Boven: Vario 700 Electric | Linksonder: Volvo FH Electric - Kipper | Rechtsonder: Volvo FH Electric - opleggetrekkert.
Bron: <https://www.ploegam.nl/emissieloos/materieel>

3.2.2 Kenmerken laadinfrastructuur

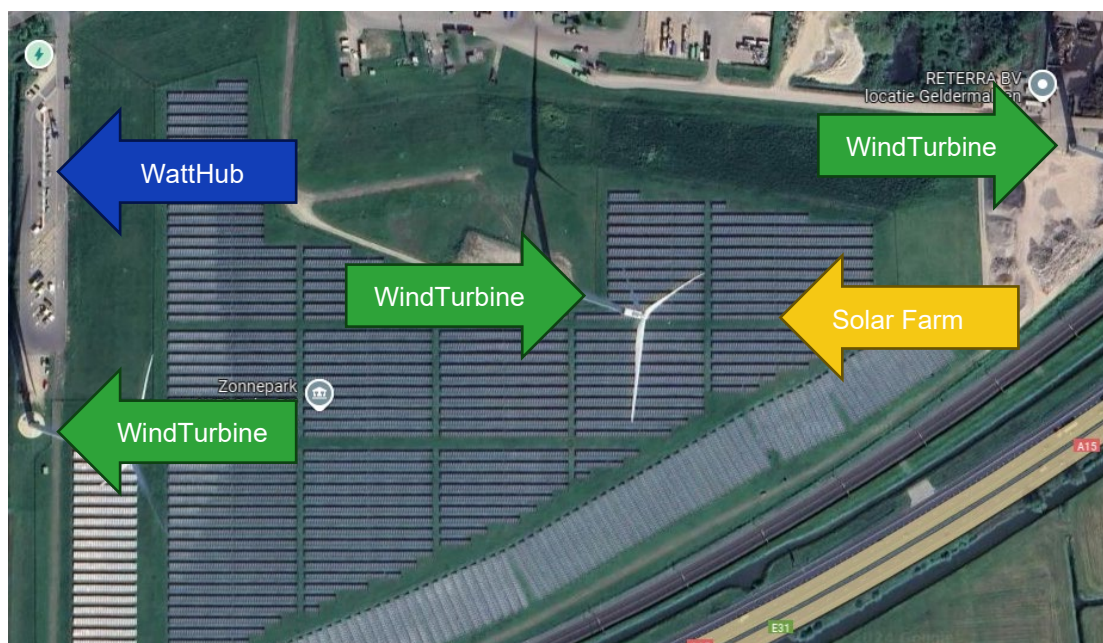
Het snellaadplein is niet alleen bedoeld voor het dijkverzwaringsproject, maar ook voor andere partijen die een stroombehoefte hebben. Het WattHub-laadplein beschikt over 36 DC-laadpunten (gelijkstroom) met een capaciteit van maximaal 400 kW per laadpunt. Daarnaast zijn er zes AC-aansluitingen (wisselstroom) die tot 250 kW kunnen leveren.

Het laadplein is direct verbonden met drie windturbines en indirect verbonden met een zonnepark, waardoor hernieuwbare energie direct kan worden gebruikt tijdens het laden.

De elektriciteitsafname van de windturbines gaat via drie transformatoren: twee van 2,2 MVA voor DC-laden volgens de CCS-standaard en één 1 MVA voor AC-aansluitingen met PowerLock-connectoren (voor containerbatterijen).

Bij afwezigheid van energie uit deze bronnen zorgt een netaansluiting met een capaciteit van 10 MVA voor elektriciteit naar het laadplein. In de zomer levert deze aansluiting 2,3 MVA aan gecontracteerde energie, terwijl deze in de winter uitsluitend beschikbaar was tijdens nachtelijke bedrijfsvoering. Op het moment van schrijven werden nieuwe contractvoorwaarden onderhandeld, die mogelijk een grotere capaciteit of flexibeler gebruik toestaan.

Hoewel de laadfaciliteiten bij WattHub voornamelijk het elektrische bouwmaterieel voor het dijkversterkingsproject ondersteunen, kunnen ook externe partijen gebruik maken van de faciliteit. Zie TNO rapport 2024 R12111 [5] voor meer informatie over de kenmerken van de WattHub-laadinfrastructuur.



Figuur 3.4: Locatie van WattHub, het windpark en het zonnepark op de kaart. Bron: Google Maps (bewerkt).

3.3 Energiegebruik en inzet ZE-materieel

Tabel 3.2 geeft een overzicht van de inzet, het energiegebruik en de geschatte dieselbesparing van vier typen elektrisch materieel over de monitoringsperiode. De DX355LC komt vier keer voor in de monitoringsdata, maar één machine laat geen valide data zien. De tabel laat zien dat de elektrische machines intensief zijn ingezet, met een groot aantal totale draaiuren en werkdagen, en dat dit in de praktijk leidt tot aanzienlijke energiebesparing en emissiereductie.

De DX355LC Electric (rupskraan) is het meest intensief gebruikte materieel in termen van totale draaiuren (6.346 uur verdeeld over 886 draaidagen, voor drie machines). Deze machine heeft tevens het hoogste energiegebruik per draaiuur (gemiddeld 66,3 kWh/uur), wat past bij de aard van de zware werkzaamheden.

Bij een maximum motorvermogen van 200 kW geeft dit een motorbelasting van 33%. Tegelijkertijd resulteert deze inzet in de grootste geschatte dieselbesparing van ca. 108.700 liter. Deze machine toont dat elektrisch materieel ook bij zware toepassingen effectief kan worden ingezet.

De Vario 700 Electric (trekker) kent het hoogste totaal aantal totale draaiuren (7.633 uur) en draaidagen (1.148), voor vier machines. Het gemiddelde energiegebruik per draaiuur is relatief laag (23,3 kWh/uur), wat wijst op een overwegend lichte tot middelzware inzet gezien het maximale motorvermogen van 205 kW (gemiddeld ca. 11% motorlast). Opvallend is het hoge aandeel stationair draaien bij deze machine (34,4% van de draaitijd). Ondanks dit hoge aandeel blijft het bijbehorende energiegebruik beperkt (5,4% van het totale verbruik).

De DX165W Electric (bandenkraan) en DL285 Electric (wiellader) laten een meer gematigd inzetprofiel zien, met respectievelijk 2.101 en 423 draaiuren. Bij de DL285 was dat het gevolg van wat storingen in de beginperiode. Het energiegebruik per draaiuur ligt bij deze machines tussen 25 en 38 kWh/uur, wat een gemiddelde motorbelasting van ca. 25% geeft. Het aandeel stationair draaien is beperkt (ca. 14-16%) en heeft slechts een geringe invloed op het totale energiegebruik.

De mate van motorbelasting en het aantal draaiuren per dag voor de verschillende machinetypen zijn sterk afhankelijk van het type werkzaamheden. Over alle machines heen is het verschil tussen het energiegebruik per draaiuur inclusief en exclusief stationair draaien gering. Dit bevestigt dat stationair draaien bij elektrisch materieel nauwelijks bijdraagt aan het totale energiegebruik, terwijl dit bij conventionele dieselmachines zorgt voor hoge stikstofemissies.

Tabel 3.2: Overzicht van de inzet, het energiegebruik en de brandstofbesparing bij de gemonitorde machines.

Type machine	DL285 Electric (1x)	DX165W Electric (2x)	DX355LC Electric (3x)	Vario 700 Electric (4x)
Draaidagen (totaal)	73	323	886	1.148
Draaiuren (totaal)	423	2.101	6.346	7.633
Draaiuren / werkdag (gem.)	5,8	6,5	7,2	6,6
kWh/draaiuur (ex idle) (gem.)	37,6	25,3	66,3	23,3
kWh/draaiuur (gem.)	36,5	24,5	65,1	22,1
Geschatte dieselbesparing (€) (totaal)	4.100	13.500	108.700	44.400
Aandeel idle (% tijd) (gem.)	16,0%	13,6%	17,0%	34,4%
Aandeel idle (% verbruik) (gem.)	3,0%	3,3%	1,8%	5,4%

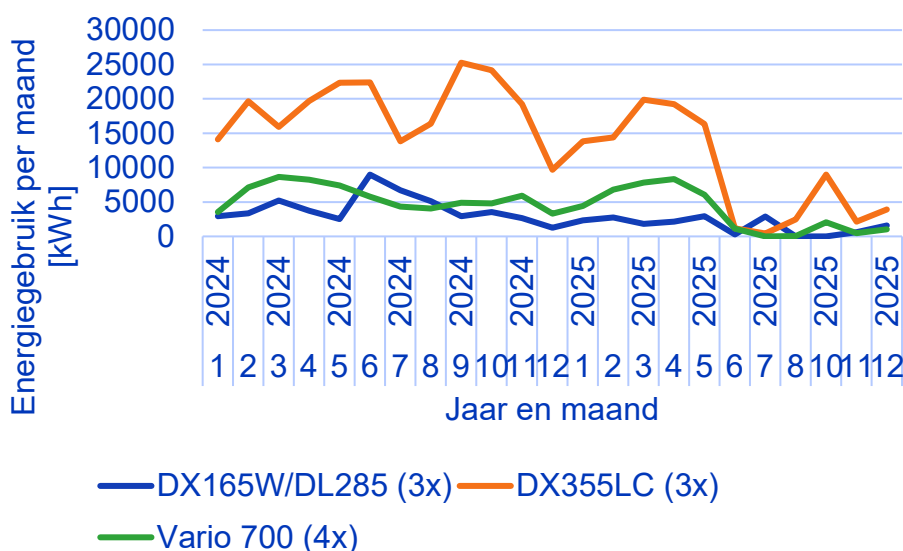
3.3.1 Maandelijks energiegebruik over 2024 en 2025

Figuur 3.5 geeft een overzicht van het maandelijkse totale energiegebruik (arbeid) in kilowattuur (kWh) van de machinegroepen DX165W/DL285 (voor dit figuur zijn deze verschillende machines samengevoegd: drie machines), DX355LC (drie machines) en Vario 700 (vier machines) over de jaren 2024 en 2025.

Per maand is weergegeven hoeveel energie elke machine heeft gebruikt, waardoor zowel seizoensinvloeden als verschillen tussen de machinegroepen inzichtelijk worden.

In 2024 is het energieverbruik gedurende het jaar relatief hoog en vertoont het duidelijke schommelingen. De DX355LC is in alle maanden de meest energie-intensieve machine, met het hoogste energieverbruik in het najaar, met name in september en oktober. De DX165W/DL285-groep laat ook grote maandelijkse variaties zien, met een duidelijke piek in de zomermaanden, vooral in juni en juli. De Vario 700-groep kent een lager energieverbruik dan de andere machinegroepen, alsook een ander patroon, met hogere waarden in het voorjaar en de vroege zomer en een afname richting het einde van het jaar.

In de eerste maanden van 2025 is een beeld zichtbaar dat vergelijkbaar is met dat van 2024, waarbij het energieverbruik van alle machines op een vergelijkbaar niveau ligt. Vanaf juni 2025 is echter een sterke daling in het energieverbruik waarneembaar. In enkele maanden komen zeer lage waarden of zelfs nul-waarden voor, wat wijst op een beperkte inzet van de machines, stilstand of mogelijk onvolledige registratie van gegevens. In de laatste maanden van 2025 neemt het energieverbruik weer licht toe, maar blijft het over het algemeen lager dan de piekwaarden die in 2024 zijn gemeten.



Figuur 3.5: Totaal energieverbruik per machinegroep over de jaren 2024 en 2025.

3.3.2 Variaties in energieverbruik per machine

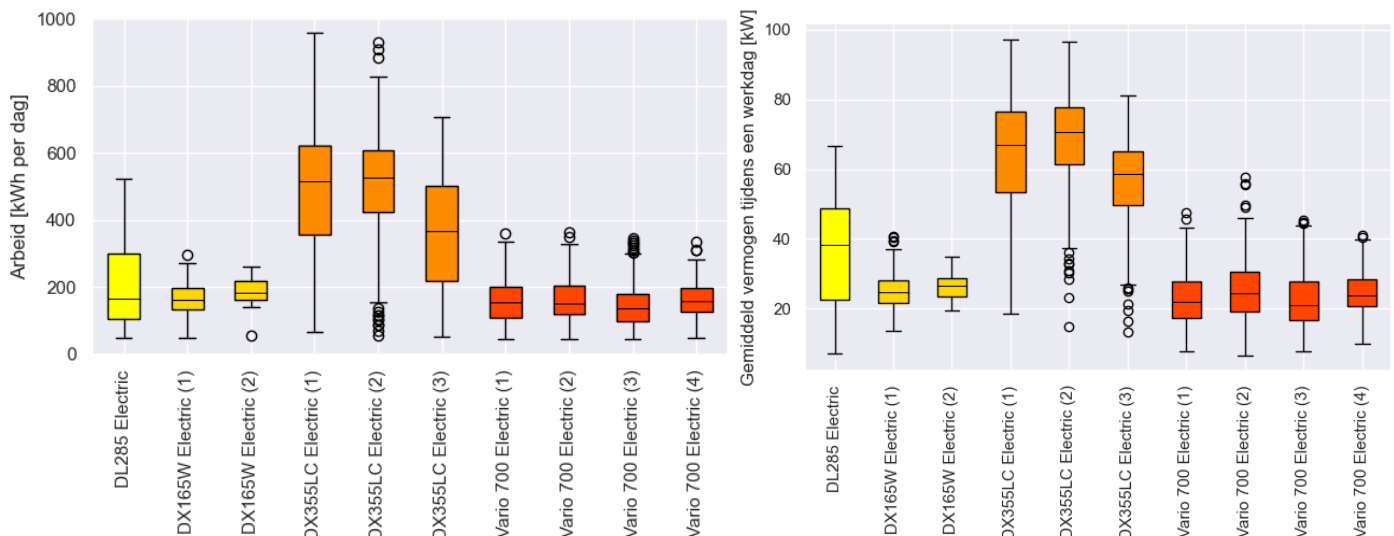
De twee figuren in Figuur 3.6 geven gezamenlijk inzicht in het energieverbruik per dag en de gemiddelde motorbelasting per dag van verschillende elektrische machines. Samen laten deze boxplots duidelijke verschillen zien in inzet, intensiteit en variatie tussen de machinegroepen. Bovendien kan met deze figuren de mate van benutting van de accucapaciteit worden geanalyseerd.

Uit beide figuren blijkt dat de DX355LC Electric de meest energie-intensieve machines zijn. Deze machines laten zowel het hoogste dagelijkse energieverbruik als de hoogste gemiddelde vermogens zien. Op basis van de meest voorkomende waarden wordt per werkdag doorgaans 400-600 kWh gebruikt, met de DX355 LC (3) als uitzondering.

Ten opzichte van de (bruto) accucapaciteit van 800 kWh betekent dit een typische ontlading van ca. 50-75% per dag. De motor levert daarbij vaak 50-80 kW, wat neerkomt op ongeveer 25-40% van het maximale motorvermogen van 200 kW. De spreiding is groot, wat wijst op sterk wisselende belasting afhankelijk van het type werkzaamheden. De aanwezigheid van meerdere uitschieters bevestigt dat de DX355LC-groep zowel dagen met zeer intensief gebruik als dagen met beperkt gebruik kent.

Het dagelijkse energiegebruik en gemiddelde vermogens van de DL285 Electric en DX165W Electric liggen duidelijk lager dan die van de DX355LC, maar in het algemeen hoger dan die van de Vario 700. De mediaan van het dagelijkse energiegebruik van de DL285 Electric ligt rond 180 kWh, met een forse spreiding eromheen. Dit kan deels veroorzaakt zijn door de storingen in de beginfase. Met een bruto accucapaciteit van 400 kWh resulteert dit in een typische accu-ontlading van ongeveer 40-60% per werkdag. Het gemiddelde vermogen per werkdag ligt vaak tussen de 20 en 50 kW, wat overeenkomt met een motorbelasting van tussen de 15% en 35%. Voor de DX165W Electric ligt de dagelijkse energie-arbeid meestal in de orde van 150-220 kWh. Bij een bruto accucapaciteit van 400 kWh komt dit neer op een ontlading van ca. 35-55% per werkdag. Het gemiddelde vermogen bedraagt ongeveer 20-30 kW, wat overeenkomt met een motorbelasting van 20-30% van het maximale vermogen van 104 kW. De spreiding is relatief klein, wat erop duidt dat de accu van deze machine vrij consistent tot ongeveer de helft wordt benut tijdens een werkdag.

De Vario 700 Electric heeft het laagste dagelijkse energiegebruik. De meest voorkomende waarden liggen rond 120-200 kWh per dag. Met een bruto accucapaciteit van 210 kWh zou dit een ontlading van ongeveer 55-95% per werkdag betekenen. In de praktijk wordt de interne accu van 70 kWh normaliter echter niet ingezet tijdens werkzaamheden. In dat geval blijft de wisselbare accu van (bruto) 140 kWh over, en is er regelmatig een accuwissel tijdens de dag nodig. Ondanks het lage gemiddelde vermogen van 20-30 kW (ongeveer 10-15% van het maximale motorvermogen van 205 kW) wordt de externe accu relatief ver ontladen. De energiemarge is hierdoor kleiner dan bij de andere machines; de spreiding in energiegebruik is daarentegen relatief klein.



Figuur 3.6: Energiegebruik per dag [kWh] (links) en gemiddeld vermogen [kW] per werkdag (rechts).

3.3.3 Detailinzichten van inzetgegevens per machine

In deze paragraaf wordt in detail inzicht gegeven in het operationele gebruik van de vier onderzochte elektrische machine-groepen: de DL285, DX165W, DX355LC en Vario 700. Hierbij worden patronen zichtbaar in dagelijkse inzet, motorbelasting en uiteindelijk de mate van stationair draaien.

Draaiuren per dag

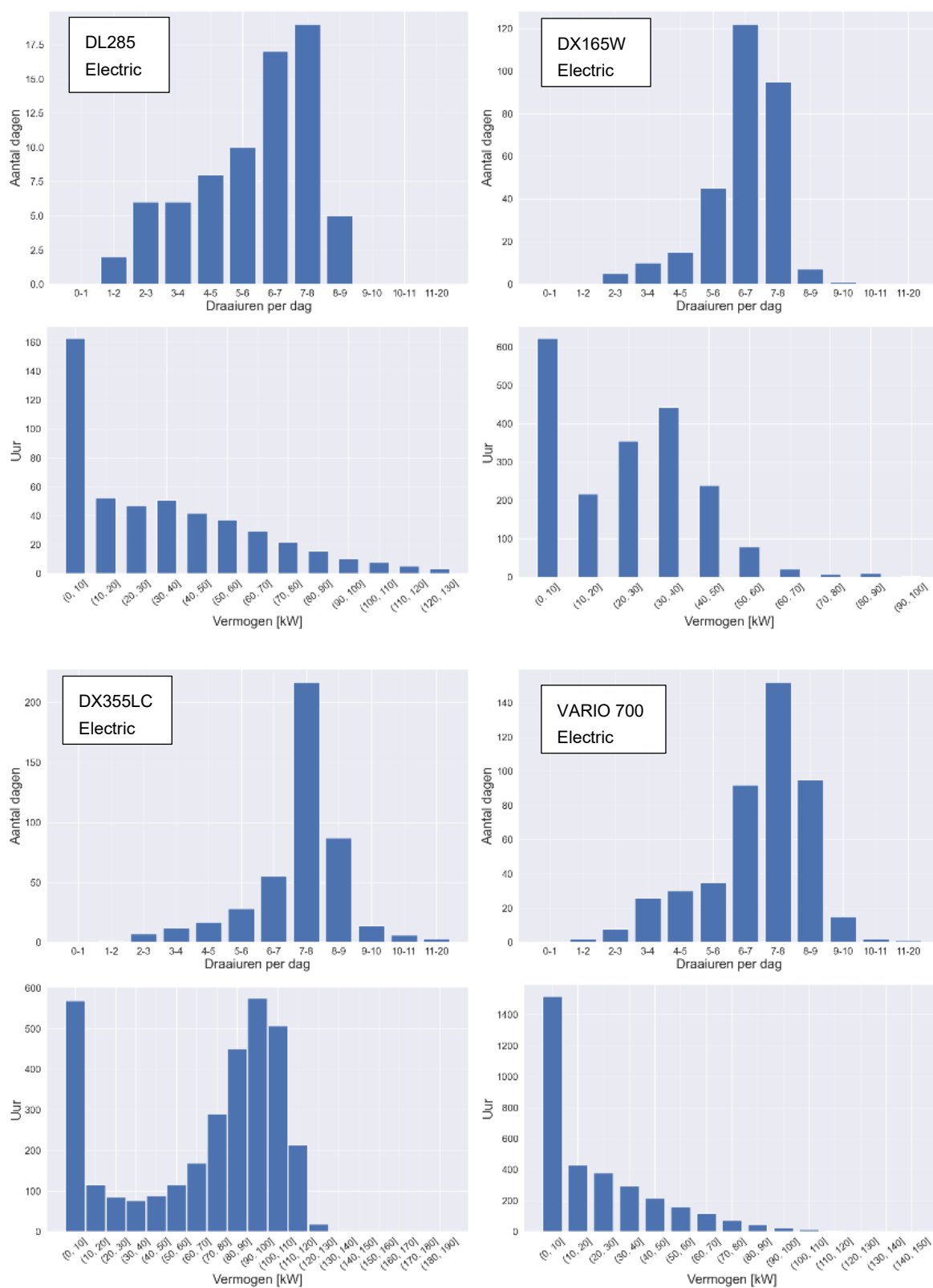
De histogrammen van de dagelijkse draaiuren in Figuur 3.7 laten zien dat alle vier de machines een vergelijkbaar inzetpatroon vertonen. De getoonde machines in dit figuur zijn individuele machines per type, de andere machines van hetzelfde type (niet zichtbaar in het figuur) laten dezelfde trend zien. Het grootste deel van de inzetdagen valt voor de DL285, DX165W, DX355LC en Vario 700 binnen de categorieën 6-7 uur en 7-8 uur per dag. Dit duidt op een relatief stabiele en voorspelbare dagelijkse operationele cyclus, waarin de machines gedurende een volledige werkdag actief zijn. Dagen met een zeer lage inzet (minder dan 3 uur) of juist een hoge inzet (meer dan 9 uur) zijn voor de meeste machines uitzonderlijk. Ondanks verschillen in de totale monitoringsperiode blijft het verdelingspatroon consistent; de machines worden dagelijks intensief gebruikt, binnen een relatief smalle operationele bandbreedte.

Vermogensverdeling

De vermogenshistogrammen (Figuur 3.7) geven inzicht in de motorbelasting tijdens deze inzet. Voor alle machines bevindt het merendeel van de bedrijfsuren zich in de laagste vermogensklasse: 0-10 kW. Deze dominantie van lage motorvermogens wijst op werkzaamheden met beperkte inzet, zoals stationair draaien, ondersteunende functies of zeer lichte werkzaamheden. Het aantal uren per vermogensklasse boven de laagste vermogensklasse verschilt vrij sterk tussen de diverse machines.

De DL285 (wiellader), met een maximaal motorvermogen van 140 kW, laat een aflopend profiel zien richting hogere vermogensklassen. Er zijn geen duidelijke pieken bij hogere vermogens, al komen de hogere vermogens soms wel voor. De DX165W (bandenkraan), met een maximaal motorvermogen van 104 kW heeft, na de lage vermogens, de meeste inzet tussen de 20 en 40 kW. Dit komt overeen met het gemiddelde vermogen per werkdag zoals beschreven in de vorige paragraaf. Vermogens boven de 60 kW komen nauwelijks voor. De DX355LC (rupskraan), met een maximaal motorvermogen van 200 kW, vertoont een duidelijke inzet tussen 70-120 kW, wat duidt op regelmatige zware werkzaamheden waarbij meer motorvermogen noodzakelijk is. Boven de 120 kW is er nauwelijks inzet. De Vario 700 (trekker), met een maximaal motorvermogen van 205 kW toont, na de zeer sterke concentratie in de laagste vermogensklassen, een afbouw richting hogere vermogens zonder een duidelijke piek. Motorvermogens boven de 90 kW komen nauwelijks voor.

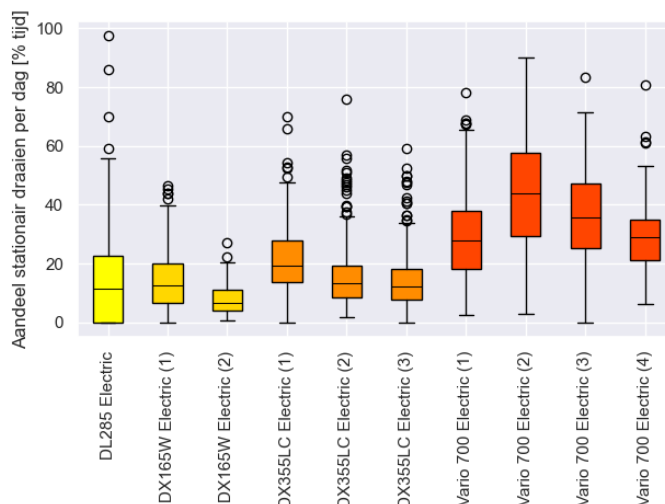
Deze verdelingen maken duidelijk dat alle machines weliswaar veel uren draaien, maar dat de mate van motorbelasting sterk verschilt. Dergelijke inzichten helpen voor optimalisatie van machinekeuze, energiemanagement (accu-capaciteit, laadsnelheid) en inzetplanning van elektrisch materieel.



Figuur 3.7: Frequentieverdelingen van vier verschillende individuele machine voor de draaiuren per dag (bovenste rij) en geleverd motorvermogen (onderste rij).

Stationair draaien

Uit de analyse van het aandeel stationair draaien per dag blijkt dat de verschillende elektrische machinetypes sterk variëren in hun stationaire gedrag (zie Figuur 3.8). Stationair draaien is bepaald door te filteren op stationair toerental. De DL285 Electric vertoont over het algemeen relatief lage stationaire tijden met een behoorlijke spreiding tussen de meetdagen. De spreiding duidt op minder constante inzetpatronen en incidenteel hogere stationaire percentages. Bij de DX165W machines is de spreiding daarentegen kleiner. Bij de DX355 Electric (1) ligt de mediane waarde wat hoger en is de variatie eveneens groter. De Vario 700 Electric valt het meest op: dit machinetype laat zowel de hoogste mediane stationaire tijd als de grootste spreiding zien. De aanwezigheid van diverse uitschieters wijst erop dat deze machine op sommige dagen aanzienlijk langer stationair draait dan andere types. Dit bevestigt het beeld uit de voorgaande paragrafen, waarbij werd beschreven dat de gemiddelde motorbelasting slechts 10-15% is, en dat een groot deel van de tijd in de laagste vermogensbin besteed wordt.



Figuur 3.8: Aandelen stationair draaien per machinetype.

3.3.4 Benutting en laadstrategie van wisselbare accu's

De grafieken in Figuur 3.9 geven gezamenlijk inzicht in de praktische benutting en laadstrategie van de wisselbare accu's die binnen het project worden ingezet. Er wordt gebruikgemaakt van twee typen accu's: de Powerbox 400 met een bruto capaciteit van 400 kWh en de Powerbox 140 met een bruto capaciteit van 140 kWh. De '400'-accu's worden ingezet in de DX165W's en de DX355LC's. De accu's worden flexibel ingezet en wisselen tussen verschillende machines. De '140'-accu's worden ingezet in de Vario 700's, waarbij de verschillende accu's wisselen tussen de verschillende machines. Het aantal accu's zorgt voor een representatief beeld geven van het daadwerkelijke gebruik in de praktijk.

In samenhang laten beide grafieken zien dat de accu's technisch betrouwbaar en bedrijfszeker worden ingezet, met een laadstrategie die gericht is op continuïteit en het voorkomen van onverwachte stilstand. Tegelijkertijd resulteert deze aanpak in ondiepe laad- en ontladcycli, waardoor de energetische benutting per cyclus beperkt blijft. Dit betekent dat het beschikbare energiepotentieel niet volledig wordt aangesproken. Uit het overzicht van de maandelijks ontladen energie blijkt dat de Powerbox 400-accu's structureel en relatief uniform worden benut.

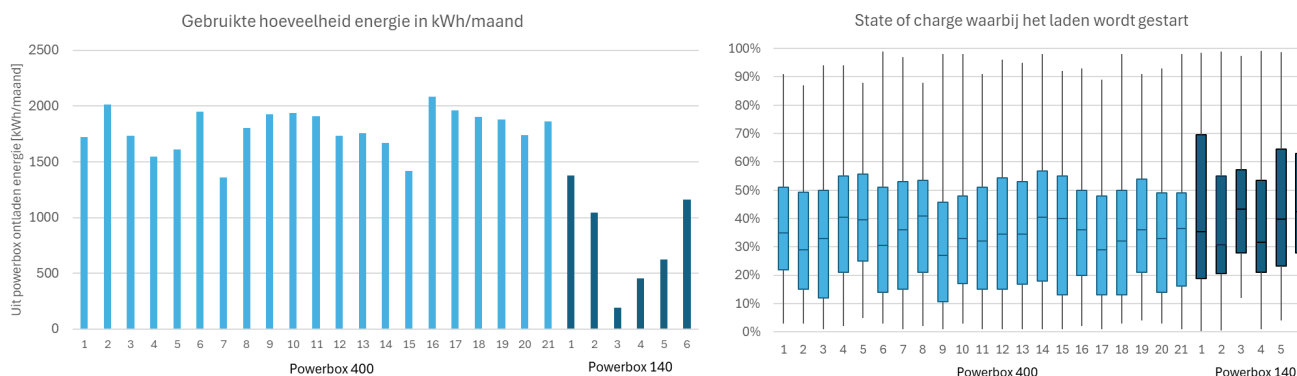
De meeste units laten een maandelijkse energieafname zien tussen ca. 1.500 en 2.100 kWh. Gegeven het energiegebruik lijkt dit relatief laag. Dit is echter een gemiddelde over alle maanden tijdens de monitoringsperiode; hier zitten ook inactieve maanden en dagen tussen, zoals de bouwvak. Aanvullend zijn er meer accu's dan machines en worden de accu's niet volledig ontladen. Gemiddeld wijst dit op meerdere (max 5-6) volledige laad- en ontlaadcycli per maand. Per "actieve" maand is dit hoger. De beperkte spreiding tussen de verschillende Powerbox 400-units suggereert dat deze accu's breed toepasbaar zijn en consistent presteren bij inzet over de verschillende machines.

De Powerbox 140-accu's laten een lagere (wat men zou verwachten bij een kleiner accupakket) en ook meer variabele maandelijkse energieafname zien. Bij drie accu's blijft de inzet beperkt tot minder dan 500 kWh per maand, terwijl de andere drie accu's oplopen tot tussen de 1.000 -1.400 kWh per maand. Het lijkt er daarom op dat niet elke accu even intensief wordt toegepast, of dat de dataregistratie niet 100% dekkend is geweest. Ten opzichte van de 400-accu's duidt dit op een minder intensieve of meer specifieke toepassing. Dit sluit aan bij de praktijk waarin deze accu's worden ingezet voor de Vario 700's, die worden gekenmerkt door een relatief lage energievraag.

Het beeld uit de maandelijkse energieafname wordt aangevuld door de analyse van de state of charge (SoC) bij het starten van het laden. Voor de Powerbox 400 wordt het laden doorgaans gestart bij een SoC tussen ongeveer 15% en 55%, met een mediaan rond 30-40%. Dit betekent dat de accu's meestal niet diep worden ontladen en dat er een ruime operationele marge wordt aangehouden. Structurele ontlading tot zeer lage SoC-waarden komt nauwelijks voor.

Bij de Powerbox 140 lijkt de SoC bij de start van laden gemiddeld iets hoger te liggen, al is de variatie groot. De mediane waarden zijn tussen de 30 en 45%. Deze accu's lijken iets eerder aan de lader gekoppeld te worden, waardoor per cyclus een beperkter deel van de beschikbare capaciteit wordt benut.

De belangrijkste optimalisatiemogelijkheden liggen niet in de accutechniek zelf, maar in de inzet- en laadstrategie, bijvoorbeeld door het laadmoment later te kiezen waar dit operationeel en logistiek haalbaar is. Hierdoor kan de benutting van de beschikbare accucapaciteit verder worden vergroot, zonder afbreuk te doen aan de betrouwbaarheid van de inzet.



Figuur 3.9: Gebruikte hoeveelheid energie per maand voor Powerbox 400 (lichtblauw) en Powerbox 140 (donkerblauw) in linkerfiguur. In rechterfiguur de State of Charge (SOC) waarmee het laadproces is gestart.

3.4 Batterijwisselproces

Batterijwissels zijn een integraal onderdeel van de inzet van de ZE-apparatuur in deze case. Voor het batterijtransport worden twee vrachtwagens en één tractor ingezet. Alle voertuigen zijn volledig elektrisch. Eén vrachtwagen vervoert de wisselbare batterijen, terwijl de andere vrachtwagen en de tractor de batterijcontainers transporteren (zie meer details in volgende paragraaf rondom de ingezette ZE-trucks). Het batterijwisselproces is in deze case deels kwantitatief gemonitord (zie vorige paragraaf) en deels kwalitatief verzameld via een fysiek bezoek. Deze paragraaf geeft een samenvatting van de verzamelde informatie tijdens het fysieke bezoek.

Eén van de drie voertuigen die verantwoordelijk is voor het batterijtransport is gedurende één werkdag gevolgd. Dit betreft de vrachtwagen die de wisselbare batterijen vervoert. Met een leeggewicht van 28 ton bedraagt het maximale laadvermogen 22 ton. Deze vrachtwagen kan (via een elektrische kraan) maximaal zeven wisselbare batterijen laden. De andere twee voertuigen vervoeren uitsluitend grote batterijcontainers. Eén daarvan is een vrachtwagen en de andere een tractor, die toegang biedt tot moeilijk bereikbare locaties. Elke trailer kan één batterijcontainer vervoeren. In totaal zijn er vijf batterijcontainers, verdeeld over de twee voertuigen. Chauffeurs moeten vaak wachten bij laadstations totdat de batterijen volledig zijn opgeladen.

3.4.1 Transportproces

Het batterijtransport begint vroeg op de dag, waarbij de chauffeur om 5:00 uur start en tussen 17:00 en 17:30 uur klaar is. Op het moment van het bezoek is één vrachtwagen voldoende voor het transport van de wisselbare batterijen. De vrachtwagen zelf heeft een batterij van 540 kWh en de op de vrachtwagen gemonteerde kraan, die wordt gebruikt voor het hijsen van batterijen, is eveneens elektrisch en beschikt over een batterijpakket van 60 kWh. De normale actieradius van de vrachtwagen is 300 km, maar door het veelvuldig gebruik van buitenwegen wordt deze actieradius vaak niet gehaald. In de winter neemt deze actieradius verder af. Regeneratief remmen kan helpen om de actieradius te vergroten (zie meer details in volgende paragraaf). De vrachtwagen wordt overdag opgeladen bij WattHub, meestal tijdens pauzemomenten zoals de lunch, om te waarborgen dat gedurende de dag voldoende energie beschikbaar is.

3.4.2 Werkproces

De chauffeur plaatst de batterijen in de machine, terwijl de machinist de elektrische componenten aansluit en loskoppelt. In de meeste gevallen komt het aantal gebrachte batterijen overeen met het aantal dat wordt meegenomen. Er is geen vast schema vanuit kantoor; machinisten communiceren rechtstreeks met de chauffeur, meestal een halve dag tot één dag van tevoren, waardoor de verantwoordelijkheid voor de coördinatie bij de machinist ligt. Op sommige locaties worden batterijen vanwege repetitieve werkzaamheden regelmatig elke ochtend gewisseld, terwijl dit op andere locaties per dag verschilt.

Batterijwissels worden niet alleen uitgevoerd wanneer batterijen leeg zijn, wat ook blijkt uit de kwantitatieve analyse in de vorige paragraaf, maar ook wanneer dit logistiek gunstig is op basis van de route. Duidelijke communicatie tussen machinist en chauffeur is essentieel voor een soepel verloop van de werkzaamheden. Vaste machinisten zijn het meest vertrouwd met dit proces, omdat zij bekend zijn met zowel de machine als het gedrag van de batterijen. Bij machines zoals rupskranen vergt het rijden veel energie en tijd, waardoor batterijen zo dicht mogelijk bij de bouwactiviteit moeten worden geplaatst.

3.4.3 Batterijwissel en laden

Het wisselen van twee batterijen bij een machine duurt doorgaans ongeveer 15-20 minuten, waarbij het opstellen van de stempels van de vrachtwagen het meest tijdrovend is. Voor tractorbatterijen verloopt het proces sneller, ongeveer 10 minuten. Dit maakt de voordelen ten opzichte van machines met een vaste batterij duidelijk. Machinisten in dit project geven over het algemeen de voorkeur aan batterijwissels, omdat dit vrijwel net zo snel is als tanken met diesel; hoewel tanken met diesel niet dagelijks nodig is. Rupskranen kunnen meestal 8 uur werken met twee wisselbare batterijen, terwijl mobiele graafmachines er slechts één nodig hebben.

Er zijn enkele graafmachines die twee keer per dag moeten worden opgeladen, omdat hun batterijpakket van 400 kWh onvoldoende is voor volledige inzet, waardoor batterijwissel een praktischere optie is. Wisselbare batterijen zijn uitwisselbaar tussen verschillende machines van hetzelfde merk en batterijen die 's ochtends worden opgehaald, worden vaak 's middags al door andere machines gebruikt.

Op sommige locaties kunnen overtollige grond of gebrek aan grip uitdagingen vormen, vooral voor volledig beladen vrachtwagens. In deze gevallen zijn rijplaten nodig voor stabiliteit. Het wisselen van batterijen gebeurt idealiter op vaste locaties waar vrachtwagens eenvoudig toegang hebben tot het terrein.

Er zijn enkele machines met niet-standaard batterijpakketten waarvoor geen extra batterijen beschikbaar zijn. Dit maakt het transport minder efficiënt, omdat niet hetzelfde aantal batterijen kan worden teruggebracht als geleverd. Het toevoegen van een extra batterij zou echter aanzienlijk duurder zijn dan de benodigde transportkosten. Daarom moeten bij deze machines de batterijen worden opgeladen wanneer zij niet in gebruik zijn.

Er wordt naar gestreefd om met zoveel mogelijk accu's te rijden, zowel heen als terug. Dit is echter niet altijd haalbaar. Dit lukt meestal wel aan het begin en einde van de dag tijdens de vaste rondes. Idealiter vindt het laden plaats na 10:00 uur vanwege lagere energiekosten, wanneer wind- en zonne-energie beter beschikbaar zijn.

3.4.4 Impact van accu-wissels op energiegebruik

Indicatief is ingeschat hoeveel energie het kost om de accu-wissels uit te voeren en hoe dit zich verhoudt tot de gebruikte energie van de elektrische bouwmaschinen. Dit is indicatief omdat niet alle benodigde informatie hiervoor is gemonitord in dit project. De energie-verhouding is voornamelijk afhankelijk van: 1) de afstand tussen de bouwplaats en het laadplein, 2) het energiegebruik van de truck en de kraan, 3) het aantal accu's wat (heen en terug) wordt vervoerd, en 4) de accucapaciteit en hoe ver deze ontladen is op het moment van ophalen. De grootste onzekerheid voor de inschatting van de impact op het energiegebruik is een monitoring van het aantal accu's wat heen en terug is vervoerd. Daarom is een losse inschatting gemaakt voor optimale ritten en minder optimale ritten.

Tijdens de optimale ritten, waarbij zeven accu's heen en terug worden vervoerd en de accu's grotendeels ontladen zijn, bedraagt het extra energiegebruik door transport ca. 2%. Bij ritten met minder accu's, die minder ver ontladen zijn, kan dit oplopen tot ca. 10%.

3.5 Energiegebruik en inzet ZE-trucks

Figuur 3.10 toont een overzichtelijke vergelijking van het dagelijkse totale energiegebruik per kilometer (kWh/km) voor veertien geanonimiseerde trucks (ploegam #1 t/m #14). De analyse is gebaseerd op dagwaarden over de periode vanaf juni 2024 tot november 2025. De trucks hebben minimaal 140 actieve dagen aan data (maar meestal meer) in de monitoringsperiode. Per voertuig is het energiegebruik weergegeven met behulp van boxplots, waarmee zowel de trend als de spreiding van het verbruik inzichtelijk worden gemaakt.

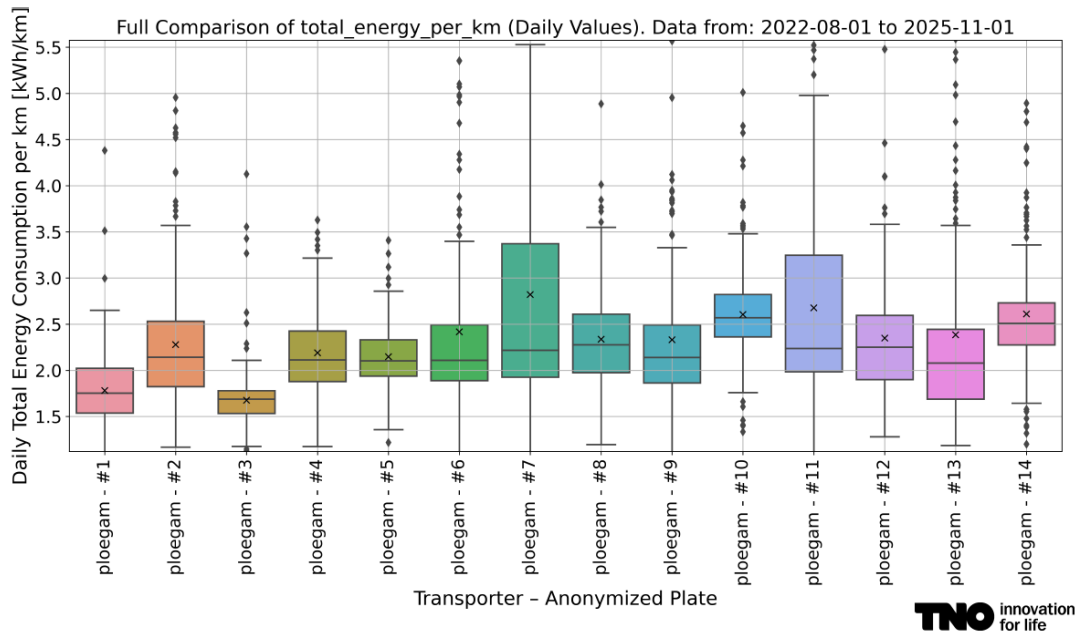
In elke boxplot geeft de horizontale lijn de mediaan van het dagelijkse energiegebruik per kilometer weer, terwijl de box de spreiding weergeeft (25e tot 75e percentiel). De afzonderlijke punten representeren uitschieters, oftewel dagen met een uitzonderlijk hoog of laag energiegebruik. Het kruisje in de box markeert het gemiddelde verbruik.

Binnen de vloot wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende voertuigtypen. Ploegam #1, #3 en #10 zijn oplegger-trekkers (één van de drie trekkers is geleverd door een zusterbedrijf van Ploegam). Deze voertuigen worden ingezet voor het transport van wisselbare accu's en batterijcontainers vanaf het laadplein naar de verschillende locaties binnen het dijkversterkingsproject. De overige voertuigen zijn kippers, die voornamelijk uitvoerend werk verrichten op de bouwplaats zelf en worden gebruikt voor het verplaatsen van grond.

Uit de figuur blijkt dat het energiegebruik per kilometer duidelijk verschilt tussen de verschillende trucks en voertuigtypen. De meeste mediane waarden liggen tussen ca. 1,6 en 2,6 kWh/km. De oplegger-trekkers #1 en #3 laten over het algemeen een relatief stabiel en gematigd energiegebruik zien. Dit past bij het meer repetitieve transportwerk over vaste routes tussen laadplein en projectlocaties. Oplegger-trekker #10 is opvallend hoog.

De kippers vertonen vaak een grotere spreiding in het energiegebruik. Dit is met name zichtbaar bij enkele voertuigen met een brede box en meerdere hoge uitschieters, zoals ploegam #7 en #11 waar dagwaarden boven de 3 kWh/km nog regelmatig voorkomen. Deze grotere variabiliteit is verklaarbaar door het wisselende karakter van het uitvoerende werk op de bouwplaats, met variaties in belading, rijafstanden, ondergrond en stop-en-go-bewegingen.

Voor aanknopingspunten voor verdere optimalisatie van inzet en energie-efficiëntie binnen het project is een hoger detailniveau nodig. De volgende paragraaf splits het energiegebruik daarom op in verschillende stukken. Daarnaast is het energiegebruik sterk afhankelijk van de operationele kenmerken, deze zijn beschreven in paragraaf 3.5.2.

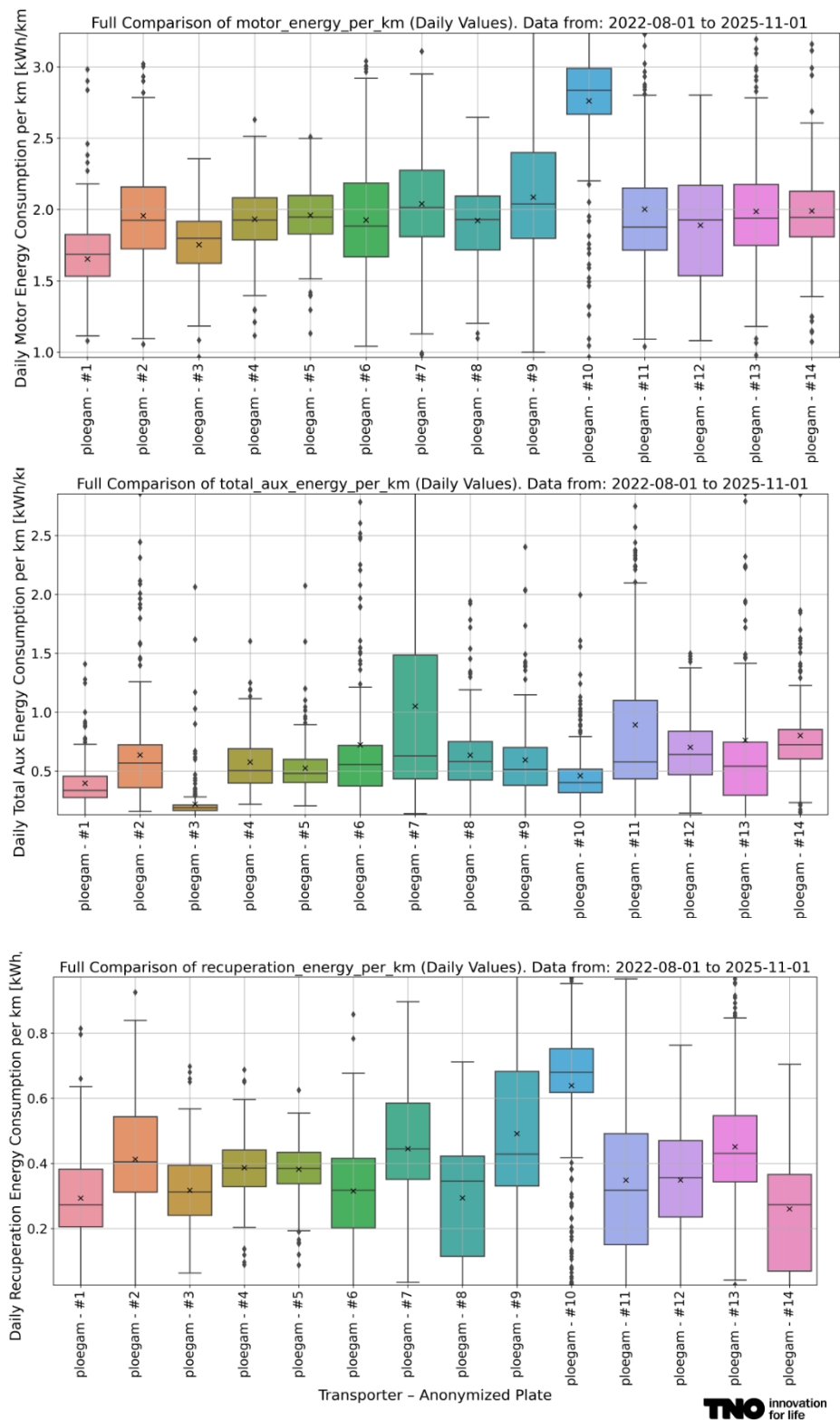


Figuur 3.10: Vergelijking van het dagelijkse totale energiegebruik per kilometer (kWh/km) voor 14 geanonimiseerde trucks.

3.5.1 Opsplitsing van energiegebruik naar aandrijflijn, hulpfuncties en regeneratief remmen

De uitsplitsing van het totale energiegebruik in afzonderlijke componenten, namelijk hulpsysteemverbruik (600V = ePTO, HVAC (verwarming en airco), 24V (zoals verlichting en ventilatie)), motorverbruik (aandrijving) en (rem)regeneratie-energie, biedt aanvullend inzicht in de verschillen tussen de voertuigen (zie Figuur 3.11). Dit verduidelijkt welke factoren het dagelijkse energiegebruik per kilometer het sterkst beïnvloeden.

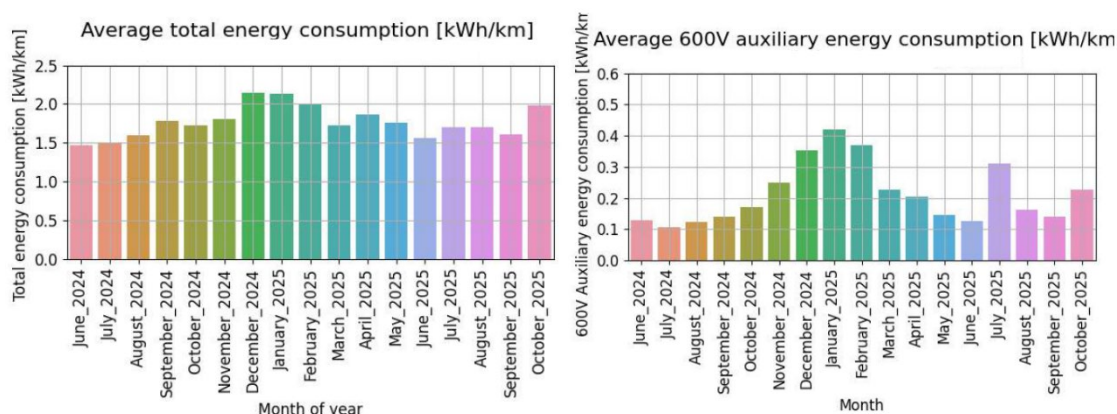
Het motorverbruik per kilometer vormt, zoals verwacht, het grootste deel van het totale energiegebruik. De meeste voertuigen laten medianen zien tussen ongeveer 1,7 en 2,1 kWh/km. De oplegger-trekkers #1 en #3 blijven relatief laag en stabiel in energiegebruik. De oplegger-trekker #10 onderscheidt zich van de rest, met een duidelijk hoger motorverbruik dat oploopt richting 3 kWh/km (maar zoals verderop beschreven ook veel regeneratie-energie bij remmen). Dit bevestigt het beeld dat dit voertuig structureel zwaarder wordt belast. Meerdere kippers laten een brede verdeling en frequente uitschieters zien, wat goed kan worden verklaard door het sterk fluctuerende werk op de bouwplaats, waar belading, rijafstanden en mogelijk ook terreincondities per dag sterk kunnen variëren.



Figuur 3.11: Vergelijking van het dagelijkse energiegebruik per kilometer (kWh/km) voor 14 geanonimiseerde trucks; waarbij de figuren van boven naar beneden respectievelijk het energiegebruik weergeven van de aandrijving, hulpfuncties en de teruggewonnen energie door remmen.

In de grafiek met het hulpsysteemverbruik is te zien dat de mediane waarden voor de meeste voertuigen ongeveer tussen de 0,3 en 0,6 kWh/km liggen. De oplegger-trekkers ploegam #1, #3 en #10 hebben een relatief stabiel profiel, wat past bij hun constante inzet op voorspelbare trajecten. Ploegam #3 valt echter op door de zeer lage mediane waarden en een nog kleinere spreiding; de oorzaak hiervan is binnen dit project niet verkend. De kippers kennen in het algemeen een hoger energieverbruik van hulpfuncties dan de oplegger-trekkers. Bij de kippers, en dan vooral bij ploegam #7 en #11, is bovendien een grote variatie zichtbaar, met regelmatige pieken die duiden op intensief gebruik van bijvoorbeeld de ePTO en/of HVAC-systemen, al dan niet tijdens stilstand. Vanwege de eenheid kWh/km kan dit ook komen door relatief weinig afstand door veel stilstand en/of korte bewegingen op de bouwplaats.

Onderstaand Figuur 3.12 geeft het energieverbruik van oplegger-trekker #1 over de verschillende maanden waarbij het linkerfiguur het totaalenergiegebruik laat zien in kWh/km en het rechterfiguur het 600V-hulpsysteem. Naast het 600V-systeem is er ook nog het 24V-systeem. Het figuur laat een duidelijke seizoensinvloed zien in het energieverbruik. De seizoensinvloed kan grotendeels worden toegekend aan het 600V-systeem. Het energieverbruik van de motor, het 24V-systeem en de teruggewonnen remenergie zijn relatief constant. In de warme maanden is het energieverbruik van het 600V-systeem laag en in de winter hoog, vermoedelijk ten gevolge van de verwarming (kan zowel cabine-verwarming zijn als mogelijk accu-verwarming). De maand juli 2025 is een uitzondering, maar dat is het gevolg van een gebrek aan data in die maand. Alle andere voertuigen, zowel de kippers als oplegger-trekkers, laten dezelfde trend zien.



Figuur 3.12: Energiegebruik [kWh/km] van de oplegger-trekker #1 over de verschillende maanden, het linkerfiguur geeft het totaalenergiegebruik weer en het rechterfiguur het 600V hulpsysteem.

Ook de regeneratie-energie per kilometer laat aanzienlijke verschillen tussen de voertuigen zien in Figuur 3.11. Hoewel de medianen voor de meeste trucks tussen 0,25 en 0,45 kWh/km liggen, varieert de hoeveelheid teruggewonnen energie sterk. Ploegam #10 scoort zeer hoog in deze categorie. Dit duidt erop dat het voertuig dynamisch wordt ingezet (er is ook een hoog motorverbruik), waarmee vervolgens grotere hoeveelheden energie kan worden teruggewonnen. Ondanks de hoge teruggewonnen energie blijft het totaal verbruik relatief hoog van Ploegam #10. Ook bij de kippers is de variatie groot. Dit hangt nauw samen met de karakteristiek van het grondverzetwerk, waarin veel remmomenten, en korte ritten voorkomen, waardoor de hoeveelheid teruggewonnen remenergie van dag tot dag sterk kan verschillen. Naast type inzet heeft de chauffeur hier een rol. Het rijgedrag van de chauffeur beïnvloedt de teruggewonnen energie. Tot slot heeft de beladingsgraad invloed, al is dit niet gemonitord binnen dit project.

3.5.2 Operationele kenmerken

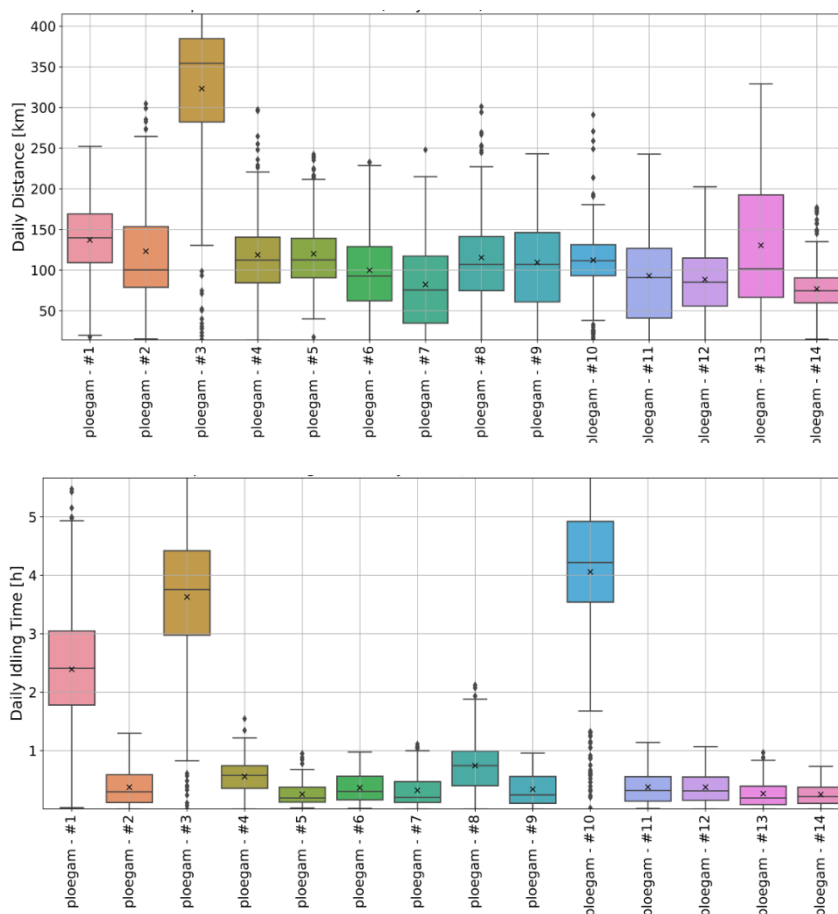
De figuren weergegeven in Figuur 3.13 met de dagelijkse afgelegde afstand en stationaire tijd (motor aan) bieden aanvullende context voor het interpreteren van het energiegebruik van de verschillende voertuigen. Aanvullend zijn voor de drie oplegger-trekkers en kippers in Figuur 3.14 frequentieverdelingen voor trips langer dan 5 kilometer weergegeven. Dit geeft aanvullende informatie ten opzichte van daggemiddelden. Door deze operationele parameters te beschouwen, wordt duidelijker welke inzetpatronen de verschillen in energiegebruik mede verklaren.

Uit de bovenste figuur in Figuur 3.13, waarin de dagelijkse afstand is weergegeven, blijkt dat er aanzienlijke verschillen bestaan tussen de voertuigen. Met name de oplegger-trekker ploegam #3 valt op met een hoge dagafstand van tussen de 300 en 400 km. Dit is een groot verschil met de andere trekker-opleggers (#1 en #10). De histogrammen in Figuur 3.14 bevestigen dat de veel voorkomende trips afwijken van de andere twee trekkers. Waarbij #1 en #10 veel trips hebben tussen de 0 en 50 km, met een piek tussen 10-20 km, heeft #3 juist veel trips van boven de 100 km.

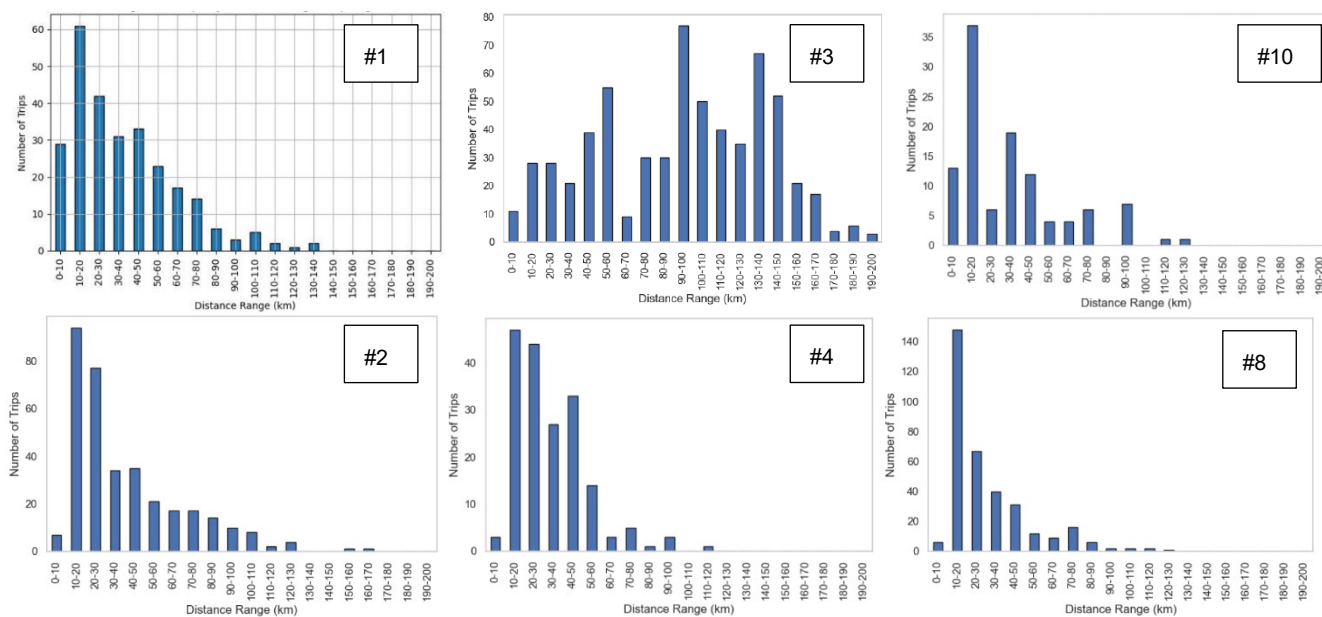
De kippers bevinden zich doorgaans in een lagere bandbreedte tussen ongeveer 70 en 150 km per dag. Sommige kippers, zoals ploegam #7, #11 en #13, kennen echter een grotere variatie in dagafstanden. De lagere afstanden van diverse kippers sluiten aan bij het feit dat zij primair worden ingezet voor werk op relatief korte afstanden binnen en rondom het projectgebied. Dit wordt bevestigd in de histogrammen, waarin trips tussen de 10 en 20 km dominant zijn. Trips boven de 100 km komen nauwelijks voor.

Figuur 3.13 toont ook de stationaire tijd per dag, die belangrijke aanvullende informatie geeft over inzetgedrag. De verschillen tussen de oplegger-trekkers en kippers zijn hier nog sterker uitgesproken dan in de andere parameters. De oplegger-trekkers laten stationaire tijden zien van tussen 2 en 5 uur per dag. Met name #3 en #10 geven hoge waarden. Mogelijk is dit te verklaren doordat er regelmatig gewacht moet worden totdat het laden van batterijcontainers voltooid is. De combinatie van veel korte afstanden, en een hoge stationaire tijd zorgt waarschijnlijk voor het opvallend hoge energiegebruik van #10 zoals geobserveerd in de vorige paragraaf. De kippers daarentegen vertonen over het algemeen lage stationaire tijden, voornamelijk liggend onder één uur per dag. Incidenteel laten sommige kippers uitschieters zien die wijzen op wachttijden of procesonderbrekingen.

De analyse van dagafstanden, tripverdelingen en stationaire tijd laat zien dat inzetpatronen sterk verschillen tussen voertuigen en het energiegebruik mede verklaren. Voor een goede interpretatie van energiegebruik is het daarom essentieel om naast het verbruik ook operationele parameters te monitoren, zoals dagafstand, triplengtes en stationaire tijd. Data op tripniveau biedt verdiepend inzicht in inzetpatronen en ondersteunt een betere duiding en voorspelling van energiegebruik.



Figuur 3.13: Vergelijking van de operationele kenmerken voor 14 geanonimiseerde trucks; waarbij de figuren van boven naar beneden respectievelijk de dagelijkse afstand en stationaire tijd (met motor aan) weergeven.



Figuur 3.14: Frequentieverdeling van ritten langer dan 5 km. Bovenste rij zijn de oplegger-trekkers (vlr: #1, #3 en #10), onderste rij zijn de kippers (vlr: #2, #4 en #8).

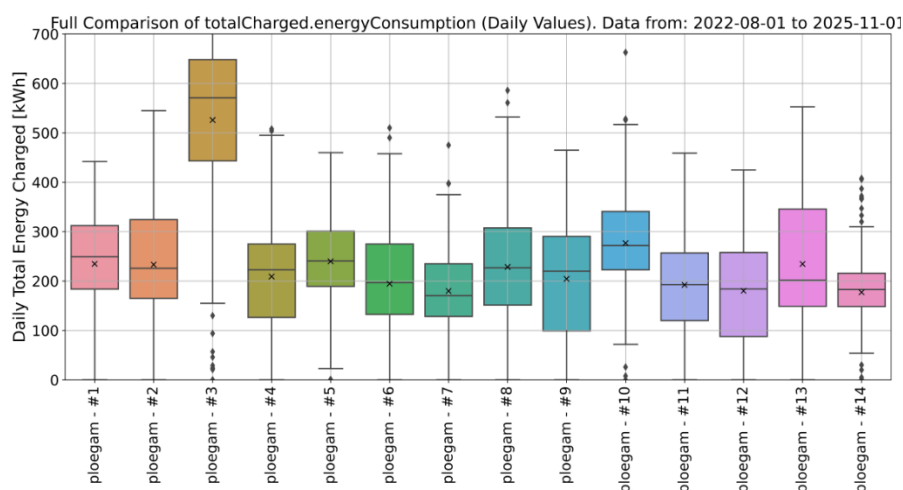
3.5.3 Laadkarakteristieken en benutting energiec capaciteit

In deze paragraaf wordt ingegaan op de laadkarakteristieken en de benutting van de batterijcapaciteit.

De analyse laat zien dat de mate van ontlading per dag binnen de vloot sterk uiteenloopt. Daarnaast blijkt dat ook het aantal dagelijkse laadmomenten sterk varieert: waar veel trucks gemiddeld één laadbeurt per dag hebben, zijn er voertuigen die tot bijna drie keer per dag laden. Dit verschil in ontladingsdiepte wijst op uiteenlopende inzetprofielen en belasting van de batterij. Vooral trucks die zowel een lage minimale SoC als een hoge laadfrequentie laten zien, worden relatief intensief gebruikt.

Figuur 3.15 vergelijkt de dagelijkse totale geladen energie (kWh) voor de veertien trucks. Zoals eerder beschreven bevinden zich drie oplegger-trekkers (ploegam #1, #3 en #10) en elf kippers in de gemonitorde vloot. De (bruto) batterijcapaciteit van elk voertuig bedraagt 540 kWh; de netto capaciteit is 460 kWh. Waardes boven ca. 460 kWh wijzen op een bijna volledige ontlading en herlading binnen een dag. De oplegger-trekker ploegam #3 valt direct op door hoge dagelijkse laadvolumes, vaak tussen 400 en 600 kWh. De andere oplegger-trekkers, #1 en #10, tonen duidelijk lagere medianen. De verschillen in energiegebruik sluiten aan op de operationele analyse van de dag-afstanden. Oplegger-trekker #3 legt dagelijks tussen de 300 en 400 km af. Dat is substantieel meer dan de andere trekkers (#1 en #10) en alle kippers.

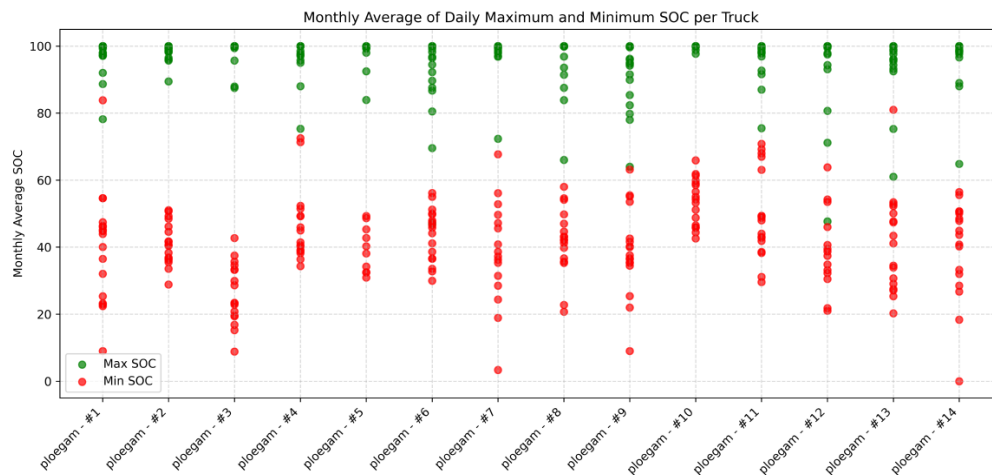
De kippers laden gemiddeld minder: hun mediane waarden liggen veelal tussen 200 en 250 kWh per dag. Het lagere totale energiegebruik weerspiegelt hun inzet op kortere trajecten, waarbij de kortere afstand meer impact heeft dan het hogere energiegebruik van de kippers in kWh/km.



Figuur 3.15: Dagelijkse totale geladen energie (kWh) voor de veertien trucks.

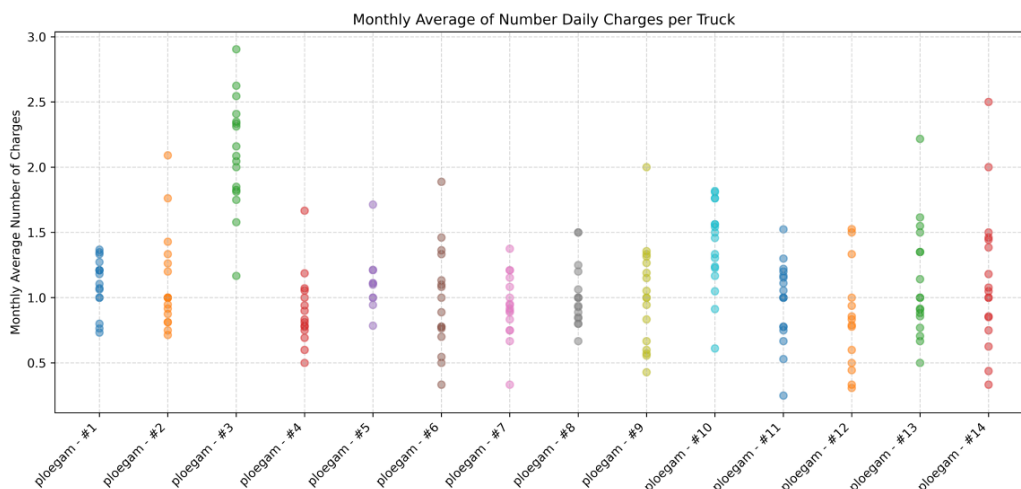
Figuur 3.16 toont de maandelijkse gemiddelden van de dagelijkse maximale en minimale State of Charge (SOC) van alle onderzochte trucks. Hieruit blijkt dat de maximale SoC voor vrijwel alle voertuigen consistent hoog ligt tussen de 90% en 100%. Dit wijst op een laadstrategie waarbij trucks vaak dagelijks (bijna) volledig worden opgeladen. De minimale

SoC vertoont echter aanzienlijke variatie tussen de voertuigen. Hierbij is geen duidelijk onderscheid tussen de oplegger-trekkers en de kippers. Sommige trucks dalen regelmatig tot lage SoC-waarden van ca. 20-30%, terwijl andere trucks hun minimale SoC voornamelijk boven 30% houden. Deze verschillen weerspiegelen variaties in gebruiksintensiteit en laadgedrag. Trucks die dagelijks lagere SoC-niveaus bereiken, worden dieper ontladen, wat de belasting op de batterij vergroot en mogelijk bijdraagt aan versneld capaciteitsverlies. Anderzijds benutten deze de batterijcapaciteit wel optimaal, wat operationeel erg efficiënt kan zijn.



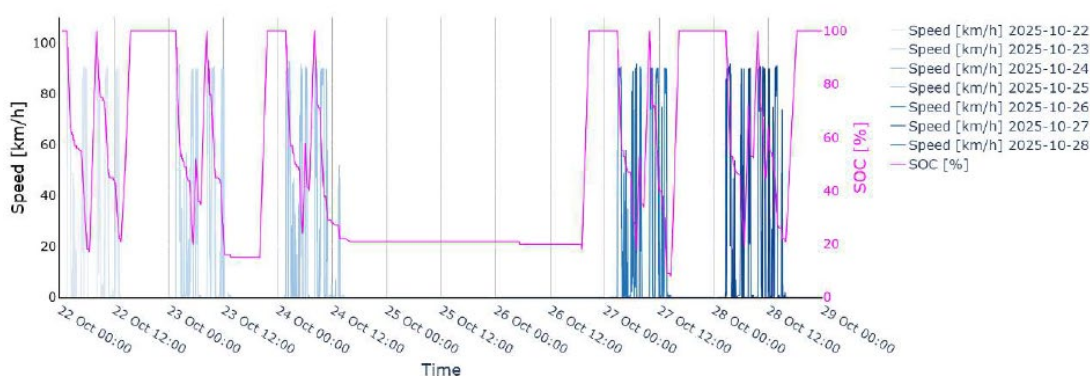
Figuur 3.16: Maandelijks gemiddelden van de dagelijkse maximale en minimale State of Charge (SOC) van de onderzochte trucks.

Figuur 3.17 geeft inzicht in het gemiddeld aantal laadmomenten per truck per etmaal. Ook hier is sprake van een duidelijke spreiding. Een groot deel van de vloot heeft gemiddeld tussen de 0,5 en 1,5 laadmomenten per etmaal. Bepaalde trucks, met name #3 (oplegger-trekker), wijken hiervan af met waarden die oplopen tot ongeveer 2,5 tot bijna drie laadmomenten per etmaal. Oplegger-trekker #3 viel hiervoor al op met een hoge dagelijkse afstand en hoog dagelijks energiegebruik, wat de meerdere benodigde laadsessies verklaart. Veel kippers hebben regelmatig minder dan één laadbeurt per etmaal, wat erop wijst dat zij voldoende hebben aan enkel in de nacht laden. Dit lijkt ook logisch gezien het energiegebruik per dag meestal lager is dan de totale batterijcapaciteit.



Figuur 3.17: Maandelijks gemiddelde van aantal laadmomenten per etmaal.

Figuur 3.18 toont het verloop van zowel de voertuigsnelheid als de State of Charge (SoC) over meerdere dagen in oktober 2025. Dit gaat om oplegger-trekker #3. De snelheid wordt weergegeven op de linker y-as (in km/h) en is per dag in verschillende blauwtinten uitgezet. De SoC wordt weergegeven op de rechter y-as (in procenten) en is in paars weergegeven. Uit de grafiek is zichtbaar dat het voertuig gedurende alle weergegeven dagen een vergelijkbaar rijpatroon heeft: perioden met hogere snelheden worden afgewisseld met fases van lage snelheid of stilstand. Op enkele dagen zijn langere periodes van inactiviteit zichtbaar (weekend). Het verloop van de SoC-lijn toont dat het voertuig doorgaans start met een hoog laadniveau (rond 100%), waarna de SoC geleidelijk daalt gedurende de rijperiode. Op meerdere momenten tijdens de dag en aan het einde van de dag is een stijging van de SoC zichtbaar. Dat zijn de laadmomenten. Dit bevestigt de meerdere laadsessies per dag voor deze truck.

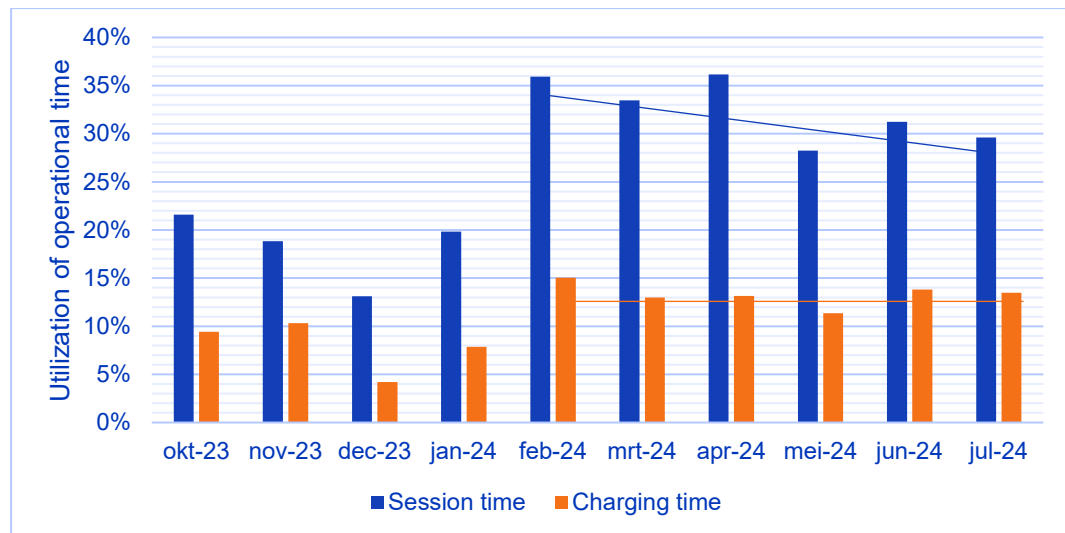


Figuur 3.18: Overzicht van snelheidsprofiel in combinatie met de SoC over een willekeurige week van oplegger trekker #3.

3.6 Stroomaanbod versus stroomgebruik

TNO rapport 2024 R12111 [5] beschrijft dat de laadinfrastructuur voldoende energie voor het Mekante Dijk-project levert, waarbij 90% van de stroom direct afkomstig is van het windpark. De resterende 10% komt vanuit het elektriciteitsnet. Er is nog voldoende groeipotentieel voor benutting van de laadinfrastructuur aangezien, ten tijde van het onderzoek, 15% van de beschikbare windenergie wordt benut. Tijdsmatig is de benutting van het laadplein ook ruim binnen de marges. Qua laadsessies wordt het laadplein voor 30% van de totale tijd benut.

Tijdens de laadsessies werd echter niet continu geladen, waardoor de daadwerkelijke laadtijd slechts 13% is. Hierdoor is er nog verbeterpotentieel in het laadgedrag. Meer details over laadkarakteristieken is vindbaar in hierboven genoemde rapportage.



Figuur 3.19: WattHub DC-laadinfrastructuur: benuttingsgraad in de tijd voor de sessie (aansluiting op de lader) en laadtijd. Operationele tijd van WattHub: 24 uur per dag, 7 dagen per week.
Bron: TNO rapport 2024 R12111 [5].

4 Case Amsterdam

De Gemeente Amsterdam streeft naar een schone en duurzame stad en wil de uitstoot op bouwplaatsen drastisch verminderen. Een belangrijk instrument om dit te realiseren is de Samenwerkingsovereenkomst (SOK) 2.0 Verhardingen³. Binnen deze overeenkomst worden werkzaamheden rondom de aanleg en onderhoud van verhardingen uitgevoerd. Dit gaat bijvoorbeeld om het ontgraven, aanvullen, afwerken en vervoeren van grond ten behoeve van aanleg wegfunderingen en profileringen, om het opbreken en aanbrengen van wegfunderingen, het opbreken/frezen van asfaltverhardingen, de aanleg van asfaltconstructies van fundering tot en met deklagen, het lokaal repareren van asfaltconstructies en het opbreken, opnemen, aanbrengen en herstraten van alle toegepaste elementenverhardingen. De vorm van samenwerkingsovereenkomsten, in plaats van traditionele RAW-bestekken, is gekozen om de gemeentelijke duurzaamheidsambities haalbaar te maken, waarbij het versnellen van de ontwikkeling van emissieloze bouwplaatsen één van de doelstellingen is van de SOK 2.0. Bij de aanbesteding is emissieloos materieel één van de kwaliteitsonderdelen met betrekking tot de prijs-kwaliteitverhouding. In de SOK 2.0 wordt het gebruik van emissieloos handgereedschap, zoals bandenzagen en trilplaten, als een vereiste opgenomen. De inschrijver (aannemer) kan meer punten behalen op dit kwaliteitsonderdeel door de ook voor andere (zwaardere) materieelsoorten emissieloos bouwen toe te passen.

In (raam)contracten, zoals de SOK 2.0, maken aannemers afspraken over de mate waarin emissieloos wordt gewerkt. De aannemers Van Gelder en Van Werven, beide partners binnen TRANSENERGY-project, zijn voor één van de percelen in Amsterdam de “SOK-aannemer”. Samen met de Gemeente Amsterdam hebben zij het doel om de ontwikkelingen rondom emissieloos bouwen te versnellen. Het oorspronkelijke plan binnen TRANSENERGY was om een bouwproject van de SOK Verhardingen te volgen, waarin deels emissievrij materieel en deels conventioneel materieel zou worden ingezet. De centrale vraag daarbij zou zijn: wat is nodig om deze bouwactiviteiten volledig emissieloos uit te voeren? Tijdens gesprekken met de aannemers en de Gemeente Amsterdam bleek echter dat het in praktijk niet altijd lukt om de afspraken uit de SOK Verhardingen na te leven. Dit roept vragen op over de oorzaken en factoren die bijdragen aan het afwijken van deze afspraken. Daarom is de onderzoeksvraag voor de case Amsterdam aangepast naar:

“Hoe kunnen keuzes binnen het bouwproces de kansen op succesvolle inzet van emissievrij bouwen beïnvloeden? En hoe wordt kennis uit de bouwsector in dit proces meegenomen?”

Het onderzoek richt zich op het volledige proces, van voorbereiding tot uitvoering, om inzicht te krijgen in waar het misgaat en welke keuzes bepalend zijn voor het succes van emissieloos bouwen.

Het is belangrijk om op te merken dat op 30 september 2025 de Uitvoeringsagenda Schone Mobiele Werktuigen bestuurlijk is vastgesteld, inclusief een routekaart met gefaseerde minimumeisen voor de inzet van emissieloos materieel tot 2030 [6].

³ <https://www.tenderned.nl/aankondigingen/overzicht/264145>

Omdat het grootste deel van dit onderzoek plaatsvond voordat deze beleidswijziging algemeen geldend was, ligt de focus op (raam)contracten waar al eerder afspraken zijn gemaakt over de mate van emissieloos werken, zoals de SOK 2.0.

4.1 Samenvatting

In de case Amsterdam staat centraal hoe in gemeente Amsterdam binnen de SOK 2.0 Verhardingen emissieloos bouwen wordt gestimuleerd, maar waarom het in praktijk niet altijd lukt om emissieloos bouwen uit te voeren volgens de gemaakte afspraken. De SOK 2.0 is een samenwerkingsovereenkomst tussen de Gemeente Amsterdam en aannemers voor de aanleg en het onderhoud van verhardingen, zoals straten en wegen, waarin de inzet van emissieloos materieel wordt gestimuleerd.

Het onderzoek bestond uit een kwalitatieve analyse met gesprekken met SOK-aannemers, het Ingenieursbureau Amsterdam en verschillende gemeentelijke afdelingen. Hieruit blijkt dat het niet altijd mogelijk is om de gemaakte afspraken over emissieloze inzet van, met name zwaarder, materieel volledig na te komen. De uitvoerbaarheid blijkt met name afhankelijk te zijn van keuzes die al vroeg in het proces worden gemaakt. Randvoorwaarden, zoals het tijdig organiseren van voldoende laad- en vermogenscapaciteit, worden in de voorbereiding vaak nog niet expliciet meegenomen. Hierdoor vallen het Ingenieursbureau en de aannemer, bij knelpunten in budget, planning of tijd voor het regelen van een netaansluiting en andere energie-infrastructuur, soms terug op conventioneel materieel.

De case laat zien dat emissieloos bouwen vooral kansrijk is wanneer de randvoorwaarden vroegtijdig worden vastgelegd met duidelijke eisen aan vermogenscapaciteit, voldoende voorbereidingstijd en goede afstemming tussen de ambtelijke opdrachtgever, het Ingenieursbureau en aannemers.

4.2 Aanpak

De oorspronkelijke onderzoeksaanpak was gericht op het monitoren van een specifiek gedeeltelijk emissieloos bouwproject binnen de SOK 2.0 Verhardingen in Amsterdam. Door de verbreding van de onderzoeksvraag en terughoudendheid van bouwprojecten om mee te werken, is de onderzoeksaanpak aangepast. Het onderzoek heeft hierdoor een meer kwalitatieve insteek gekregen, waarbij de nadruk ligt op het verkrijgen van inzicht in processen en besluitvorming. Een kwalitatieve aanpak is gekozen omdat het vraagstuk complex is, kwantitatieve data beperkt beschikbaar was en praktijkervaringen en perspectieven van betrokken partijen cruciaal is om de knelpunten en succesfactoren te begrijpen. In plaats van één project te volgen, is gekozen voor een bredere benadering binnen de keten. Er zijn gesprekken gevoerd met Van Gelder (één van de raamcontractanten binnen de SOK 2.0), vertegenwoordigers van het Ingenieursbureau Amsterdam en diverse andere gemeentelijke afdelingen. Deze kwalitatieve aanpak is bedoeld om inzichten te geven in het proces, de verdeling van rollen en verantwoordelijkheden en de knelpunten die een succesvolle uitvoering van emissieloos bouwen kunnen belemmeren.

Naast dit kwalitatieve deel is uiteindelijk ook een kwantitatieve component toegevoegd. Eén van de aannemers stelde een bouwproject in Hoek van Holland beschikbaar voor metingen, waar deels emissieloos wordt gewerkt. Deze metingen bieden aanvullende informatie over de praktische haalbaarheid en prestaties van emissieloos materieel in de uitvoering.

4.3 Bevindingen

Procesinrichting en -voorbereiding

In de eerste fase van projecten binnen de SOK 2.0 vervult Verkeer & Openbare Ruimte (V&OR) een belangrijke rol als één van de opdrachtgevende directies van de gemeente. In deze fase worden projecten alleen op hoofdlijnen uitgewerkt. De ambtelijk opdrachtgever formuleert de ambities ten aanzien van emissieloos werken, maar verdwijnt na vaststelling van de scope - via een PID (projectinitiatiedocument) of SOF (startopdrachtformulier) - grotendeels uit beeld. Vervolgens wordt het Ingenieursbureau (IB) verantwoordelijk voor ontwerp en uitvoering.

Deze inrichting brengt verschillende risico's met zich mee:

- **Cruciale rol van de ambtelijke opdrachtgever bij uitvraag en aanbesteding.** De ambtelijke opdrachtgever bepaalt in een vroeg stadium de randvoorwaarden, voordat de opdracht bij het IB wordt belegd. Het IB beschouwt het vastgestelde budget en de planning vervolgens als kaderstellend en zal bij afwijkingen eerder kiezen voor conventioneel materieel.
- **Onvoldoende aandacht voor randvoorwaarden emissieloos bouwen.** Risico's en aanvullende randvoorwaarden, zoals de vermogensvraag van emissieloos materieel, worden in de voorbereidende fase nog niet altijd expliciet meegenomen. De verantwoordelijkheid voor het organiseren van energievoorzieningen ligt in principe bij de aannemer. Wanneer deze echter pas enkele maanden voor uitvoering kan handelen, is het vaak te laat om emissievrije voorzieningen te realiseren. Dit speelt met name bij projecten met complexe of hoge vermogensbehoefte. Emissieloos bouwen vraagt daarom om expliciete aandacht in de voorbereiding, mede gezien de inmiddels opgelopen wachttijd voor een bouwaansluiting van meer dan een jaar. Door de lange doorlooptijd voor aansluitingen kunnen beslissingen hierover niet worden uitgesteld tot de uitvoeringsfase. Het moet onderdeel zijn van de projectvoorbereiding, waar de opdrachtgever de regie voert. Deze verantwoordelijkheid is momenteel echter nog niet expliciet belegd. Het gevolg is dat een situatie kan ontstaan waarin emissieloos bouwen in praktijk onhaalbaar blijkt, omdat laadvoorzieningen niet tijdig kunnen worden gerealiseerd. Bovendien vereist dit dat de opdrachtgever beschikt over specifieke kennis van de elektrische capaciteitsbehoefte, waaronder schattingen van de energievraag, het aandeel dat op locatie (in situ) zal worden geladen, de eventuele inzet van accucontainers voor opslag van energie en wat dat betekent voor de zwaarte van de aan te vragen netaansluiting. Voorafgaand inzicht in de energie- en vermogensvraag, bijvoorbeeld aangeleverd door de aannemer, kan bijdragen aan een realistische dimensionering van de benodigde infrastructuur.
- **Extra inspanning en beperkte capaciteit.** Emissieloos bouwen vraagt om aanvullende inspanningen in de projectvoorbereiding en legt extra verantwoordelijkheden bij de betrokken partijen. Dit vergt capaciteit die niet altijd beschikbaar is. De uitvoerbaarheid van projecten staat bovendien al onder druk door andere factoren, zoals toenemende eisen aan omgevingsmanagement. Bovendien is het soms al lastig om een aannemer te vinden en projecten in uitvoering te krijgen. In deze context wordt emissieloos werken vaak ervaren als een extra drempel, waardoor het minder prioriteit krijgt.

- **Vershil tussen beleid en uitvoering.** Een andere observatie is het verschil tussen de beleidsorganisatie en de uitvoeringsorganisatie van de gemeente. Beleidsmatige ambities worden niet altijd tijdig of consequent geïmplementeerd in de uitvoering, waardoor wensen vanuit de gemeente rondom emissieloos bouwen niet vanzelfsprekend worden nageleefd.

4.4 Conclusies

De bevindingen laten zien dat al vroeg in het proces risico's ontstaan die de uiteindelijke uitvoering van emissieloos bouwen belemmeren. In de uitvraag krijgt emissieloos bouwen vaak nog een ondergeschikte rol, wat doorwerkt in latere projectfasen. Onduidelijke of ontbrekende eisen vanuit de ambtelijke opdrachtgever kunnen er in de praktijk toe leiden dat het Ingenieursbureau en aannemers onvoldoende tijd en ruimte hebben om emissievrij werken daadwerkelijk te realiseren. Ook in de uitvoering lijken er vaker knelpunten te ontstaan bij grotere projecten die een complexere energievraag hebben. Dit lijkt samen te hangen met de organisatorische complexiteit en het ontbreken van voldoende tijd, kennis en/of budget om de randvoorwaarden voor emissieloos bouwen op orde te krijgen.

Een belangrijk inzicht is dat het borgen van emissieloos bouwen binnen de SOK 2.0, en in de toekomst ook bij projecten die onder de Uitvoeringsagenda Schone Mobiele Werktuigen vallen, expliciete aandacht vraagt in vroege projectfasen. Juist daar worden de randvoorwaarden bepaald waarbinnen ontwerp en uitvoering plaatsvindt. Dit vraagt om een duidelijke verankering van emissieloos bouwen in de uitvraag door de ambtelijk opdrachtgever, met concrete eisen ten aanzien van energievoorziening en een planning en budget waarin rekening is gehouden met emissieloze inzet. Daarbij komt dat voldoende capaciteit en kennis in de voorbereidingsfase bij de opdrachtgever over elektriciteitsbehoefte een randvoorwaarde is voor een haalbare en consistente toepassing van emissieloos bouwen. De haalbaarheid van emissieloos bouwen kan mogelijk worden vergroot door het Ingenieursbureau vroegtijdig te betrekken en projecten tijdig te gunnen, zodat keuzes in ontwerp en uitvoering beter kunnen worden afgestemd op emissieloze inzet. Hiermee wordt de kans vergroot dat beleidsambities daadwerkelijk worden vertaald naar een emissievrije uitvoering in de praktijk.

Een andere belangrijke les is dat emissieloos bouwen de bestaande rol- en verantwoordelijkheidsverdelingen onder druk lijkt te zetten. Taken en verantwoordelijkheden die traditioneel in de uitvoeringsfase bij de aannemer lagen, zoals het organiseren van energievoorzieningen en het borgen van voldoende vermogenscapaciteit, vragen bij emissieloos bouwen om eerdere besluitvorming en regie in de voorbereidingsfase. Dit maakt het noodzakelijk om verantwoordelijkheden opnieuw en expliciet te beleggen. Wanneer deze herbelegging uitblijft, ontstaat onduidelijkheid over eigenaarschap, wat het tijdig organiseren van randvoorwaarden bemoeilijkt en haalbaarheid van emissieloos bouwen onder druk zet.

4.5 Monitoring bouwproject Hoek van Holland

Ondanks intensieve verkenning bleek het moeilijk om binnen Amsterdam een geschikt bouwproject te vinden waar monitoring van emissieloze bouw kon worden uitgevoerd. De beoogde metingen binnen de SOK-projecten kon daardoor niet plaatsvinden. Om die reden is gekozen voor een passend alternatief buiten de gemeentegrenzen. Het aannemersbedrijf Van Gelder heeft een bouwproject in Hoek van Holland beschikbaar gesteld voor metingen. Het gaat om het vervangen van de riolering in een woonwijk met elektrisch materieel.

Tabel 4.1 geeft een overzicht van het elektrische materieel dat bij dit bouwproject is ingezet. De Swepac FB400B is een elektrische trilplaat met een motorvermogen van 10 kW. De machine is uitgerust met een compacte, vaste batterij van 6,6 kWh (bruto) die wordt opgeladen met een externe lader. De DX165W Electric is een 17,5-tons bandenkraan van Staal, voorzien van een elektromotor met een nominaal vermogen van 104 kW. Deze machine beschikt over een verwisselbaar batterijpakket, de Powerbox 400, met een netto-capaciteit van 385 kWh. De ETEC graafmachine heeft een motorvermogen van 120 kW en is uitgerust met een vaste batterij. Daarnaast wordt een elektrische truck van Volvo ingezet. Hiervoor zijn geen monitoringsgegevens beschikbaar. Ook van de elektrische shovel zijn geen specificaties bekend en ontbreken monitoringsgegevens.

Tabel 4.1: Overzicht specificaties van elektrisch materieel bij het bouwproject van Van Gelder in Hoek van Holland.

Naam	Type machine	Motorvermogen
Swepac FB400B	Trilplaat	10 kW
DX165W Electric	Bandenkraan	104 kW
ETEC	Graafmachine	120 kW
	Shovel	
Volvo Elektrische truck	Truck	

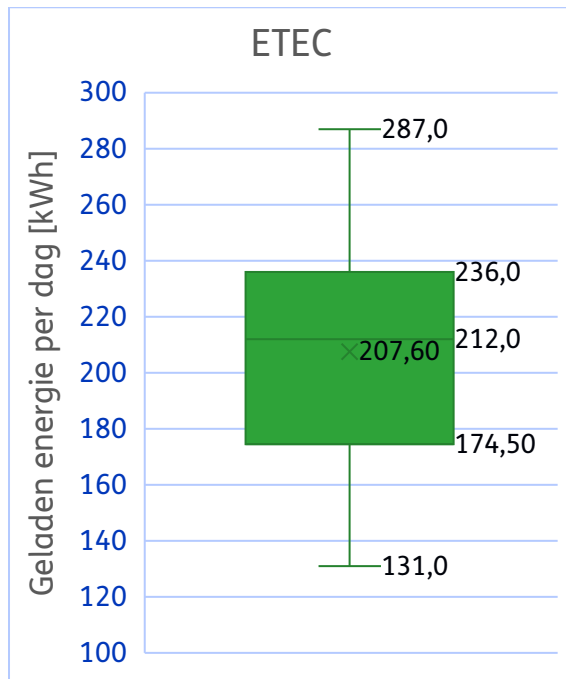


Figuur 4.1: Foto van de elektrische trilplaat.

4.5.1 Energiegebruik en inzet ZE-materieel

ETEC graafmachine

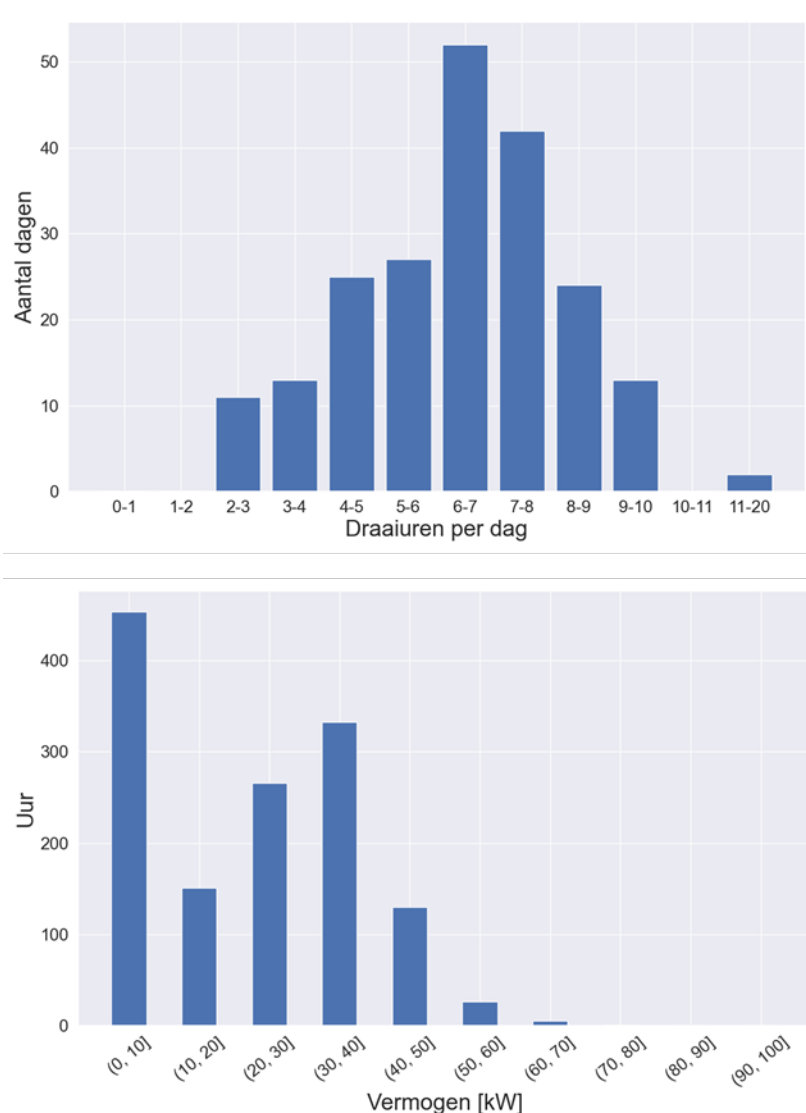
Van het energiegebruik van de ETEC graafmachine zijn gegevens beschikbaar over de periode februari 2025 tot en met half juli 2025. In deze periode gaat het om 125 inzetdagen, waarin in totaal ongeveer 25.950 kWh aan geladen energie is geregistreerd. Figuur 4.2 laat de spreiding zien van het dagelijks energiegebruik van de ETEC. Het gemiddelde energiegebruik bedraagt 208 kWh per dag en varieert tussen ongeveer 131 en 287 kWh. Omdat het aantal draaiuren per dag niet bekend is, geeft de figuur uitsluitend inzicht in het totale dagelijkse energiegebruik en niet in relatie tot inzetduur of belasting. De gemiddelde laadtijd bedraagt 10,5 uur en bevindt zich doorgaans tussen de 8,5 en 12,5 uur per dag.



Figuur 4.2: Spreiding van de geregistreerde geladen energie per dag [kWh].

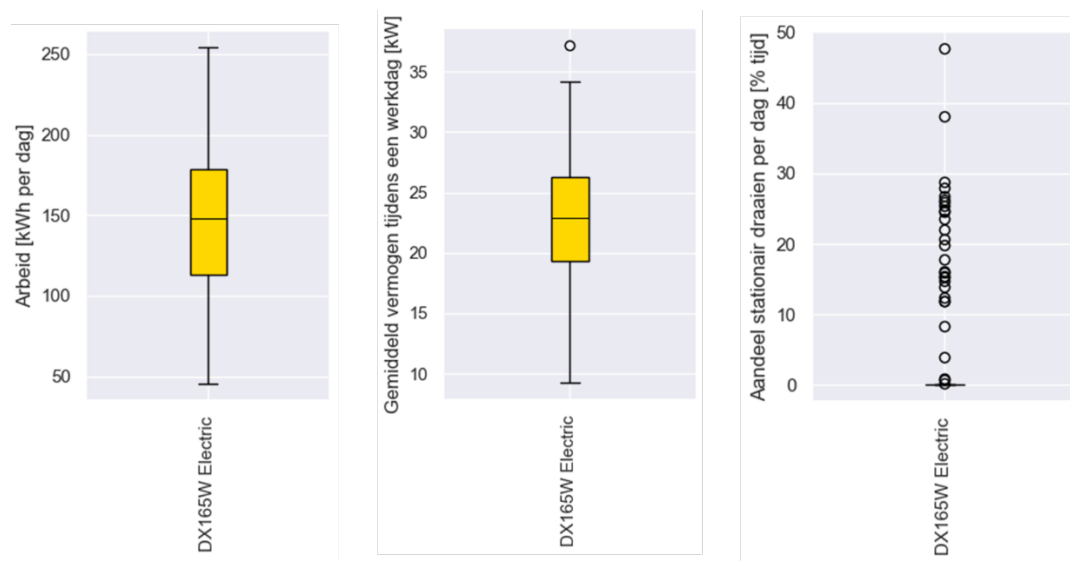
DX165W

Voor de DX165W bandenkraan van Staal zijn gegevens beschikbaar over de periode 16 juli 2024 tot en met 31 oktober 2025, met in totaal 1.478 uur aan data. Figuur 4.3 toont in de bovenste rij een histogram van het aantal draaiuren per dag. Gemiddeld wordt de machine 6,5 uur per dag ingezet, wat neerkomt op ongeveer 225 inzetdagen. Het merendeel van de inzetdagen valt binnen de categorieën van 6-7 uur en 7-8 uur per dag. Dit duidt op een relatief stabiele dagelijkse operationele inzet, waarbij de machine doorgaans gedurende een volledige werkdag actief is. Dagen met een zeer lage inzet (minder dan 3 uur) of juist een hoge inzet (meer dan 9 uur) komen incidenteel voor. De vermogenshistogram in Figuur 4.3 (onderste rij) geeft inzicht in de motorbelasting tijdens deze inzet. Het merendeel van de draaiuren valt binnen de laagste vermogensklasse (0-10 kW). Dit betreft werkzaamheden met een beperkte belasting, zoals stationair draaien, ondersteunende functies of zeer lichte werkzaamheden. Na de lage vermogensklasse bevindt het grootste deel van de inzet van de bandenkraan zich tussen de 30 en 40 kW.



Figuur 4.3: Frequentieverdeling van de draaiuren per dag (boven) en geleverd vermogen [kW] (onder) voor de DX165W bandenkraan.

Figuur 4.4 toont drie boxplots met het energiegebruik per dag [kWh], het gemiddeld vermogen tijdens een werkdag [kW] en het aandeel stationair draaien per dag [% tijd]. De figuur laat zien dat het dagelijkse energiegebruik meestal in de orde van 110-180 kWh ligt. Bij een accucapaciteit van 385 kWh komt dit neer op een ontlading van ca. 30-45% per werkdag. Het gemiddelde vermogen (middelste plot in Figuur 4.4) bedraagt ongeveer 20-25 kW, wat overeenkomt met een motorbelasting van ongeveer 19-24% van het maximale vermogen van 104 kW. In de boxplot van het aandeel stationair draaien (rechts) is een cluster waarneembaar rond de 20 - 30%. Op veel dagen draait de machine dus een substantieel deel van de tijd (20 - 30%) stationair. Dit komt overeen met het beeld dat een groot deel van de draaiuren zich in de lage vermogens (0 - 10 kW) bevindt. De spreiding is echter groot, wat duidt op een variatie in gebruikspatronen of type werkzaamheden.



Figuur 4.4: Energiegebruik per dag [kWh] (links), gemiddeld vermogen [kW] per werkdag (midden) en aandeel stationair draaien per dag (rechts) voor de DX165W bandenkraan.

5 Case Harderwijk

Voor het woonrijp maken van gebiedsontwikkeling *Waterfront Fase 3*, heeft gemeente Harderwijk een innovatieve aanbesteding in de markt gezet voor de bouw van 980 woningen [7]. Harderwijk koos ervoor om bij de aanbesteding een uitvraag te doen met de ambitie om emissieloos te werken. De gemeente bood daarbij zelf de laadvoorziening aan waarvan de aannemer gebruik kon maken. Daarmee faciliteert de gemeente een stroomaansluiting door een laadhub met containers te plaatsen, waar het elektrische materieel kan laden. De gemeente voorziet daarmee in een belangrijke voorwaarde voor emissieloos werken.

De laadhub heeft drie containers, waarvan twee containers rechtstreeks zijn aangesloten op het stroomnet. De derde container bevat zonnepanelen en accu's en kan daardoor ook zonder stroomnet functioneren. De laadhub is gerealiseerd door VONK samen met AIC en Roelofsen Infra [7]. In de laadhub zitten stroomverdelers en monitoring-apparatuur om ervoor te zorgen dat het elektrische materieel op een slimme manier oplaadt [8]. Dit voorkomt het ontstaan van pieken en machines die niet op tijd vol zijn. Er is een energiedashboard om onder meer het opladen en energiegebruik in te zien. Er zijn mobiele laadunits als back-up.

De werkzaamheden worden uitgevoerd door Boskalis. Het gaat om het woonrijp maken van het gebied, ofwel de afwerking van de openbare ruimte. Dat gaat om werkzaamheden, zoals het aanleggen van straten en stoepen, het plaatsen van verlichting, bankjes, fietsenstallingen, ondergrondse afvalcontainers en het aanleggen van riolering en groenvoorzieningen. Op de bouwplaats gaat alles emissieloos. Boskalis zorgt zelf voor het emissieloze materieel, ook voor de onderaannemers. Hiervoor zijn verschillende elektrische machines aangeschaft, voornamelijk de zwaardere machines, zoals een elektrische knijperwagen, een elektrische shovel en een elektrische knikmops. Ook heeft Boskalis een 25 ton Doosan rupskraan laten ombouwen door ETEC / ELM-groep. Emissieloos materieel voor stratenmakers, zoals trilplaten en stampers, worden gehuurd. Dat geldt ook voor minigravers en een 8,5 tons Hitachi rupskraan. [9]

Elke type machine kent specifieke operationele uitdagingen bij emissieloos werken. Uit een artikel van GWW Totaal [9] blijkt bijvoorbeeld dat trilplaten door hun compacte ontwerp slechts beperkte ruimte bieden voor een accu, wat resulteert in een geringe accucapaciteit en daarmee een beperkte inzetduur. De elektrische rupskraan kan doorgaans wel een volledige werkdag worden ingezet, omdat de werkzaamheden bij Harderwijk relatief licht zijn voor de rupskraan. Bij het rupsen wordt wel veel energie gebruikt, dus er dient wel rekening mee te worden gehouden dat er na afronding van de werkzaamheden voldoende restlading beschikbaar moet zijn om terug te rijden naar de laadhub. Voor de elektrische shovel geldt dat de beschikbare accucapaciteit onvoldoende is om er een hele werkdag mee te overbruggen, zelfs wanneer tijdens de pauze wordt bijgeladen via een snellader. In de praktijk betekent dit dat in de middag wordt overgeschakeld op kleiner elektrisch materieel, zoals knikmopsen, om de werkzaamheden voort te zetten. Deze voorbeelden, zoals beschreven in GWW Totaal [9], illustreren dat de inzet van elektrisch materieel in sterke mate afhankelijk is van zorgvuldige planning van gebruiksduur, laadmomenten en materieelwissels.

Het transport vindt nog niet volledig emissieloos plaats. Het kernpersoneel van Boskalis rijdt wel met elektrische voertuigen en er is een elektrische buggy aangeschaft voor het vervoer van personen tussen de bouwkeet en de bouwplaats. Eén van de onderaannemers heeft gezorgd voor een elektrische bus voor het vervoer van zijn personeel [9]. De toeleveranciers van materialen voeren het transport nog niet emissieloos uit, omdat zij nog niet beschikken over een elektrische vrachtauto.

In deze case is bekeken in hoeverre de daadwerkelijke energievraag van het elektrische materieel en het laadgedrag aansluiten op de beschikbare infrastructuur. Hiervoor zijn activiteitenlogs van materieel en laaddata geanalyseerd. In de gesprekken met de partners binnen de case Harderwijk kwam de wens naar voren om ook naar de financiële aspecten te kijken van emissieloos bouwen. Daarom is ook een Total Cost of Ownership (TCO) vergelijking uitgevoerd tussen een 25-tons rupsgraafmachine met verbrandingsmotor en een elektrische variant.

5.1 Samenvatting

In de case Harderwijk realiseren de gemeente Harderwijk en aannemer Boskalis gezamenlijk een emissieloze bouwplaats binnen de gebiedsontwikkeling Waterfront Fase 3. De gemeente faciliteert hiervoor een laadhub met drie laadcontainers, waardoor de benodigde laadinfrastructuur al vroeg is geborgd.

Boskalis zet divers elektrisch materieel in, waaronder zwaar materieel zoals een elektrische graafmachine, shovel en een omgebouwde 25-tons rupskraan, aangevuld met gehuurd klein materieel zoals trilplaten en minigravers. Hoewel alle werkzaamheden op de bouwplaats emissieloos plaatsvinden, is de materiaaltoelevering nog niet volledig zero-emissie door beperkte beschikbaarheid van elektrische vrachtwagens bij leveranciers.

Een analyse van de activiteitenlogs van het elektrisch materieel en data van de laders laat zien dat inzet en energiegebruik nog niet betrouwbaar aan elkaar kunnen worden gekoppeld. Door handmatige registratie, variërende motorbelasting en het ontbreken van machine-specifieke data ontstaan er afwijkingen tussen geschat energiegebruik en geladen energie. Een betere monitoring en betrouwbare koppeling van gegevens is nodig voor een betrouwbare analyse en het optimaliseren van energielogistiek.

Een illustratieve Total Cost of Ownership (TCO)-vergelijking zien dat een elektrische 25-tons rupsgraafmachine ca. twee keer duurder is in inzet per draaiuur dan een dieselvariant. Dit is gebaseerd op één voorbeeld en sterk afhankelijk van projectfactoren, zoals energieprijzen en type laadinfrastructuur. Voor andere modellen en andere machinetypen kunnen de kosten eveneens aanzienlijk verschillen; dat is in deze case niet onderzocht.

De case toont aan dat emissieloos bouwen technisch haalbaar is, mits randvoorwaarden tijdig worden georganiseerd. Vroege borging van laadinfrastructuur en een goede samenwerking tussen de gemeente en aannemer zijn belangrijke succesfactoren geweest. Knelpunten liggen vooral bij emissieloos transport in de keten en (voor de optimalisatie van energielogistiek) bij de kwaliteit van monitoringsdata.

5.2 Data-analyse inzet machines en gebruik laders

Op basis van de beschikbare gegevens van het bouwproject Waterfront Fase 3 is een analyse gemaakt om te evalueren hoe de operationele activiteiten van elektrische bouwmachines matchen met hun bijbehorend laadgedrag. De focus ligt op hoeveel energie deze machines naar schatting gebruiken tijdens de dagelijkse werkzaamheden en het vergelijken van dit gebruik met de geregistreerde laadgegevens van de laadpunten op de bouwplaats. Deze analyse maakt deel uit van de bredere inspanning om de haalbaarheid, prestatie en logistieke vereisten van het elektrificeren van materieel op bouwplaatsen beter te begrijpen.

Databronnen

Tabel 5.1 beschrijft de gebruikte databronnen. De gebruiksgegevens bevatten de activiteitenlogs van de machines, waaronder datum en tijdstip, type activiteiten en duur. De machinisten registreren via een tablet met welke machine welke activiteiten (bijvoorbeeld straatwerk, lossen zand, rupsen) plaatsvinden en de duur daarvan.

Tabel 5.1: Gebruikte databronnen

Dataset	Beschrijving	Doel
Activiteitenlogs	Beschrijft per machine welke activiteiten hebben plaatsgevonden inclusief datum, tijdstip, type taak en duur.	Wordt gebruikt om het energiegebruik te schatten op basis van wanneer en hoe lang machines actief zijn.
Laaddata	Beschrijft voor twee laadpunten hoeveel energie (kWh) er per dag is geladen.	Wordt gebruikt voor het vergelijken van geladen energie met geschat energiegebruik.

De gegevens van de laadsystemen tonen hoeveel energie (kWh) er per dag gedurende de periode van één jaar naar de machines is geladen. De data is afkomstig van twee laders. Eén lader wordt voornamelijk gebruikt voor het bijladen van de ETEC elektrische kraan. De andere lader wordt voornamelijk gebruikt voor het overige materieel. Uit gesprekken met Boskalis blijkt dat dit niet altijd wordt opgevolgd, omdat machines meestal worden geladen op basis van welke lader vrij is. Daardoor kan er geen één-op-één match gemaakt worden tussen de gegevens van de laadsystemen en de gebruiksgegevens van de machines.

Voorbewerking ruwe data

De ruwe activiteitendata bevat gedetailleerde logbestanden van machineactiviteiten. Om betrouwbare berekeningen van het energiegebruik te kunnen maken, zijn verschillende filter- en voorbewerkingsstappen uitgevoerd (deze opsomming is niet volledig, maar bevat de meest relevante stappen):

- **Alleen activiteiten op dezelfde dag:** alleen activiteiten die volledig binnen één dag plaatsvonden zijn meegenomen, om complicaties door meerdaagse registraties te voorkomen.
- **Verwijderen van waarden met ongeldige duur:** records met negatieve of ontbrekende waarden zijn verwijderd om betrouwbare operationele tijden te garanderen.
- **Uitsluiten van korte activiteiten:** activiteiten korter dan één uur zijn verwijderd om vertekening van energiegebruik te voorkomen.

- **Tijdsfiltering:** alleen taken binnen realistische werktijden zijn meegenomen:
 - starttijd tussen 06:00 en 20:00;
 - eindtijd tussen 06:00 en 22:00.
- **Groeperen van operationele duur:** Activiteiten zijn gegroepeerd op machine-ID en datum, waarna de dagelijkse duur is opgeteld om het totale aantal operationele uren per machine per dag te verkrijgen.
- **Koppeling met laaddata:** activiteiten zijn gekoppeld aan laaddata op basis van datum. Alleen dagen die in beide datasets voorkomen zijn meegenomen in de analyse.

Schatting van het energieverbruik

Om het energieverbruik van de elektrische bouwmaschinen te schatten, is de operationele duur uit de activiteitenlogboeken omgerekend naar energieverbruik (kWh). Hiervoor zijn onder andere de vermogensspecificaties per type materieel gebruikt. Elke type machine heeft een kenmerkend nominaal elektrisch vermogen (kW), dat het maximale stroomverbruik tijdens gebruik weergeeft. In Tabel 5.2 is het nominaal vermogen per machines gespecificeerd.

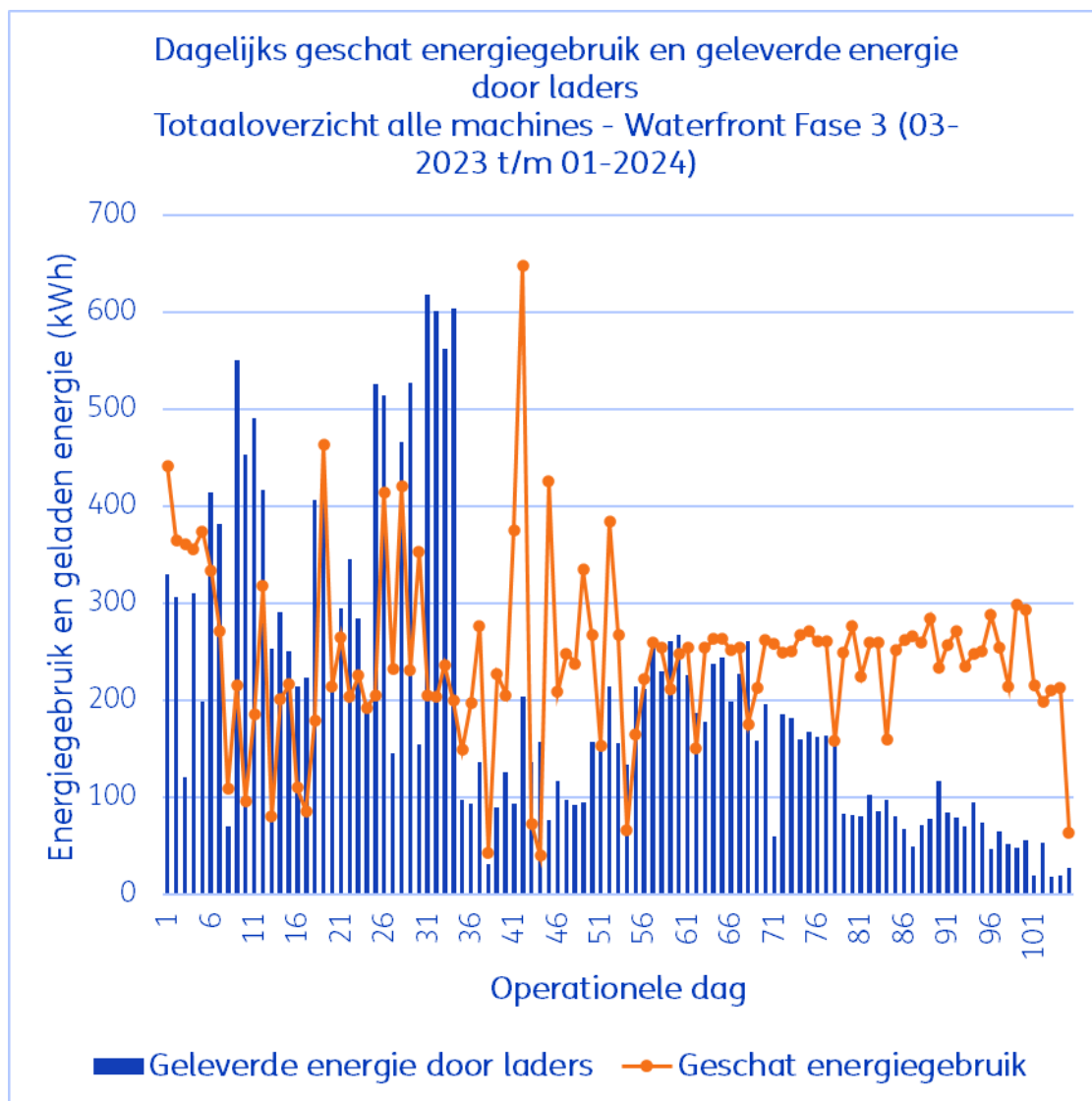
Tabel 5.2: Overzicht machines

Machine / OSEquipment Type	Nominaal vermogen (kW)
E-TEC elektrische kraan	120 kW
E-Shovel	100 kW
Knikmops / Mini loader	25 kW
Doosan elektrische graafmachine	104 kW
Tractor en grondkar	50 kW

Het nominaal vermogen wordt, samen met de inzetduur (draaiuren), gebruikt om het energieverbruik (kWh) te schatten. Daarbij is rekening gehouden met het feit dat machines niet continu op vol vermogen draaien en dat de werkelijke motorbelasting varieert door wisselende werkzaamheden en perioden van stationair draaien. Ook zijn er efficiëntieverliezen die optreden in de batterij en lader. Voor de inschatting van het energieverbruik is daarom gebruikgemaakt van een berekeningsmethode waarin een gemiddelde motorbelasting is aangenomen en een correctie voor laad- en batterijverliezen is toegepast. Dat resulteert in een schatting van de hoeveelheid energie die nodig is geweest om de activiteiten van elke machine uit te voeren.

Resultaten data-analyse

Figuur 5.1 geeft een overzicht van het dagelijks geschatte energieverbruik en de geleverde energie door de twee laders (in kWh) voor alle machines waarvoor data beschikbaar is. De gegevens bestrijken de periode van maart 2023 tot en met januari 2024. Deze vergelijking biedt inzicht in het verschil tussen het berekende energieverbruik (de oranje lijn) en de geregistreerde laaddata (de blauwe staven).



Figuur 5.1: Vergelijking van geschat energieverbruik en geregistreerde laaddata (in kWh) per operationele dag voor alle machines. Deze grafiek toont hoe het geschatte gebruik zich verhoudt tot de door de lader geleverde energie gedurende de periode maart 2023 t/m januari 2024.

Tijdens de gehele beschouwde periode is een duidelijke discrepantie zichtbaar tussen het geschatte energieverbruik en de door de laders geleverde energie. Op meerdere dagen overschrijdt het energieverbruik van de machines de hoeveelheid geleverde laadenergie. Daarentegen zijn er ook dagen waarop de geleverde energie door de laders substantieel hoger ligt dan het gebruik. In het begin van de tijdlijn vertonen zowel gebruik als laden sterke fluctuaties, met laadpieken boven de 500 kWh. In latere perioden stabiliseert het energieverbruik van de machines, terwijl de laadactiviteit afneemt en onregelmatig blijft. De grafiek toont het totaalbeeld van alle machines en beide laders. Een analyse op machineniveau is niet mogelijk, omdat laders in de praktijk niet strikt aan specifieke machines zijn toegewezen en laadmomenten niet worden gekoppeld aan een specifieke machine.

De vergelijking in Figuur 5.1 maakt duidelijk dat de huidige monitoringsopzet de werkelijke relatie tussen machinegebruik en laden niet betrouwbaar vastlegt. Er zijn verschillende redenen waarom de schatting van het energieverbruik niet nauwkeurig is.

Het geschatte energiegebruik wordt onder andere beïnvloed door de aanname van een vaste factor voor de motorbelasting. In werkelijkheid varieert het energiegebruik per dag door fluctuaties in taakintensiteit en belasting, wat niet volledig wordt gevat in deze factor. Daarnaast kan de operationele data hiaten of onnauwkeurigheden bevatten door handmatige registratie, waardoor het beeld van de feitelijke activiteiten op locatie mogelijk niet accuraat is. Dit bemoeilijkt een betrouwbare inschatting van het energiegebruik verder. Een andere belangrijke kanttekening is dat er op de bouwlocatie meerdere laadpunten aanwezig zijn, maar dat er maar bij twee laders een elektriciteitsmeter is geïnstalleerd, wat de volledigheid van de data beperkt.

Verbetering van de monitoringsopzet is mogelijk door:

- Het koppelen van elk laadmoment aan de betreffende machine, zodat gebruiks- en laaddata beter gematcht kunnen worden.
- Het robuuster maken van het monitoringssysteem voor activiteitenregistratie, waarbij voor elke machine per activiteit of per werkdag het aantal draaiuren en bij voorkeur het energiegebruik (kWh) wordt vastgelegd.

Monitoring van energiegebruik biedt inzicht in de spreiding van de energievraag over de verschillende werkdagen. Dit maakt het ook mogelijk om beter in te schatten op welke dagen de accucapaciteit voldoende is en wanneer een accuwissel of bijladen noodzakelijk is.

5.3 Total Cost of Ownership (TCO)-berekening

Om inzicht te krijgen in de financiële consequenties van de keuze voor een elektrische machine ten opzichte van een machine met een verbrandingsmotor is een berekening van de Total Cost of Ownership (TCO) uitgevoerd. De berekening is ter illustratie en geeft een beeld van de kosten over de gehele levensduur van de machine, inclusief aanschaf, onderhoud, brandstofverbruik/energiegebruik en restwaarde.

Als voorbeeld is een vergelijking gemaakt voor een 25-tons rupsgraafmachine, waarbij gebruik is gemaakt van de TCO-tool van ENI (versie 3.1, 19-09-2024) [10]. Voor de berekening van de TCO zijn de inputwaarden gegeven in Tabel 5.3 en Tabel 5.4. Deze gegevens vormen de basis voor de vergelijking tussen de rupsgraafmachine met verbrandingsmotor en een accu-elektrische variant. De gebruikte inputwaarden zijn niet gebaseerd op praktijkdata die binnen deze case zijn verzameld. Waar mogelijk zijn waarden gebaseerd op beschikbare bronnen of input van de aannemer. Indien deze niet beschikbaar waren, zijn standaardwaarden (default) van de ENI-tool toegepast. De berekening dient uitsluitend ter illustratie.

Tabel 5.3: Inputwaarden ENI TCO-tool (versie 3.1): basisgegevens

Basisgegevens	
Machinenaam	ETEC E250LC Elektrische rupsgraafmachine
Aantal draaiuren per jaar (8u per dag)	1600
Investeringsjaar	2024
CO ₂ -kosten meenemen	Nee
Subsidie en/of fiscale voordelen	Nee

Tabel 5.4: Inputwaarden ENI TCO-tool (versie 3.1): kosten.

Kostencategorie	Sub-kostencategorie	Machine met verbrandingsmotor	Accu-elektrische machine
Investering - Aanschaf	Aanschafprijs machine	160.000	420.000 ⁴
Gebruikskosten - Verzekering	Maandelijkse verzekeringspremie	283 (o.b.v. [11])	662 (o.b.v. [11])
Gebruikskosten - Onderhoud	Onderhoudskosten per draaiuur	5,38 (o.b.v. [11])	4,96 (o.b.v. [11])
Gebruikskosten - Onderhoud	Max. draaiuren machine	8.000	8.000
Gebruikskosten - Onderhoud	Max. aantal laadcycli	n.v.t.	3.000 (ENI default, [10])
Gebruikskosten - Onderhoud	Aantal laadcycli per jaar	n.v.t.	800 (ENI default, [10])
Gebruikskosten - Onderhoud	Accu's wisselbaar	n.v.t.	nee
Gebruikskosten - Onderhoud	Aanschafprijs wissel accu's	n.v.t.	n.v.t.
Gebruikskosten - Onderhoud	Afschrijvingsperiode machine in jaren	5	5
Gebruikskosten - Onderhoud	Afschrijvingsperiode batterij in jaren	n.v.t.	5
Verbruik	Energiedrager	Diesel	Elektriciteit
Verbruik	Stage normering	Stage V	n.v.t.
Verbruik	Prijs per liter of kWh	1,30	0,50 ⁵
Verbruik	Verbruik diesel (liter/uur) of elektra (kW/uur)	14 (o.b.v. [11])	52,5 (conversiefactor 3,75 kWh/liter diesel)
Verbruik	Prijs per liter AdBlue	0,90 (ENI default, [10])	n.v.t.
Verbruik	Verbruik AdBlue (liter/uur)	1 (ENI default, [10])	n.v.t.
Aanvoer van energie	Transport van diesel (€/liter)	0,02 (ENI default, [10])	n.v.t.
Aanvoer van energie	Wisselen van accu's en/of transport per dag	n.v.t.	300 (ENI default, [10])
Einde gebruiksfase	Vervangingswaarde (VW)	168.311 (ENI default-berekening, [10])	441.817 (ENI default-berekening, [10])
	Restwaarde percentage van VW	15%	10%
	Restwaarde einde gebruiksfase	25.247	44.182
	Restwaarde percentage van batterij	n.v.t.	10%

⁴ De aanschafkosten zijn exclusief extra batterijpakket. Voor machines die niet een volledige werkdag kunnen draaien op één accu, wordt er in praktijk vaak een extra batterijpakket aangeschaft om tussentijds te kunnen wisselen. De TCO van de accu-elektrische machine valt in dat geval hoger uit.

⁵ Het verbruik in kWh/uur is inclusief de kosten van de laadvoorziening. In praktijk is er veel variatie in de kosten van het opladen, waarbij vooral het al dan niet aanwezig zijn van een geschikte netaansluiting nabij de bouwlocatie een grote impact heeft op de kosten [10].

Tabel 5.5: Totaalkosten gemaakt per draaiuur (op basis van de uitkomsten uit de ENI TCO-tool (versie 3.1), tabblad Meerjarenexploitatie [10])

Type	Machine met verbrandingsmotor	Accu-elektrische machine
ETEC E250LC Elektrische rupsgraafmachine		
Energie	€19,10	€26,25
Onderhoud	€5,38	€4,96
Verzekeringen	€2,12	€4,97
Aanvoer	€0,28	€37,50
Machinist	€35,00	€35,00
Afschrijving	€16,85	€46,99
Totaal	€78,73	155,67

Tabel 5.5 laat zien dat voor dit illustratieve voorbeeld de totale inzetkosten per uur van een accu-elektrische machine ca. twee keer hoger liggen dan die van een machine met verbrandingsmotor. Dit verschil wordt voornamelijk veroorzaakt door de hogere aanschafkosten en de energiekosten (inclusief kosten van de laadvoorziening en aanvoer van energie). In de berekeningen zijn de voordelen van beschikbare subsidies voor de aanschaf van emissieloos materieel niet meegenomen. Per bouwmachine kan een groot bedrijf via de Subsidieregeling Schoon en Emissieloos Bouwen 2026 (SSEB) 25% van de meerkosten vergoed krijgen; voor het midden- en kleinbedrijf en micro-ondernemingen bedraagt dit 30%⁶.

De weergegeven kosten zijn gebaseerd op een illustratief voorbeeld en kunnen sterk variëren. Er bestaan grote verschillen per type machine en grote verschillen per type laadvoorziening (zie ook de analyse van de Bouwplaats van Morgen [11]). Daarnaast wordt verwacht dat het kostenverschil tussen accu-elektrische machines en machines met verbrandingsmotor in de toekomst zal afnemen, onder invloed van technologische ontwikkelingen, schaalvoordelen en veranderende energieprijzen.

5.4 Conclusies

In de case Harderwijk faciliteerde de gemeente de laadhub, wat een succesvolle bijdrage is geweest in het realiseren van een emissieloze bouwplaats. Door deze randvoorwaarde al in een vroeg stadium te borgen, neemt de uitvoerbaarheid voor de aannemer aanzienlijk toe.

Hoewel het werk op de bouwplaats volledig emissieloos wordt uitgevoerd, is het transport in de toeleverketen van materialen nog niet volledig zero-emissie. De belangrijkste oorzaak is de beperkte beschikbaarheid van elektrische vrachtwagens bij leveranciers. Het organiseren van emissieloos transport is daarmee nog een knelpunt en vraagt om verdere afstemming binnen de keten.

In de vergelijking tussen de inzetdata (activiteitenlogs) en de data van het gebruik van de laders zijn discrepanties zichtbaar tussen het geschat energiegebruik en de geregistreerde laaddata.

⁶ <https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/sseb/aanschaf>

Dit wordt onder andere veroorzaakt door handmatige registraties van activiteiten, variatie in motorbelasting die niet volledig wordt gedekt door een uniforme aanname, en het ontbreken van koppelingen tussen machines en laadsessies. Dit laat zien dat het lastig is om kwalitatief goede en consistente data te verzamelen. Hierdoor was het in deze case niet mogelijk om inzet, energieverbruik en laadsessies betrouwbaar te matchen, wat verdere optimalisatie van de energielogistiek bemoeilijkt.

De illustratieve TCO-vergelijking (ENI-tool v3.1) voor een 25-tons rupskraan laat zien dat de totale inzetkosten per uur van de elektrische variant ca. twee keer hoger liggen dan de totale inzetkosten per uur van de dieselvariant. In de berekening zijn ook kosten van laadvoorzieningen meegenomen. Er bestaat sterke variatie in de totale kosten van elektrisch materieel, afhankelijk van factoren zoals het type machine, de laadvoorziening, de energieprijzen en de aanwezigheid van subsidies. Hierdoor kunnen de totale inzetkosten per uur aanzienlijk verschillen en moet de TCO projectspecifiek worden berekend om tot een betrouwbare inschatting te komen.

6 Case ProRail

Binnen deze case gaat het primair om de ervaringen met het onttrekken van stroom afkomstig van een nabijgelegen (spoor)onderstation. Aanvullend wordt het bouwproject voorzien van stroom door reguliere netspanning alsook door externe batterijcontainers voor de energievoorziening.

Het project betreft werkzaamheden waarin de verdiepte ligging van het spoor in Vught wordt voorbereid. Dit betreft een pilotproject waarbij gunningscriteria zijn toegepast die gericht zijn op het stimuleren van zero-emissie (ZE) materieel. De uitvoerende aannemer is geen onderdeel van het TRANSENERGY-project.

De specifieke onderzoeksvraag die vanuit TRANSENERGY voor deze case is geformuleerd luidt: *“Welke oplossingsrichtingen zijn mogelijk om de barrières te verminderen voor de implementatie van laadvoorzieningen voor verschillende typen spoorbouwplaatsen?”*

Hierbij is een specifieke focus op de stroomvoorziening middels het (spoor)onderstation. De aanpak binnen deze case is opgezet als een praktijkgerichte pilotstudie, waarin technische data is gecombineerd met kwalitatieve inzichten uit de uitvoering. Centraal stond het ophalen van ervaringen en data bij zowel ProRail als de uitvoerende aannemer, met als doel zowel operationele als organisatorische aspecten van de laadinfrastructuur in beeld te brengen.

Aan de zijde van de aannemer zijn praktijkervaringen verzameld over het dagelijks gebruik van elektrisch materieel, laadstrategieën, logistiek rondom laden en wisselen van accu's, en knelpunten in de tijdelijke energievoorziening. Parallel hieraan zijn interviews gehouden met de opdrachtgever, gericht op aanbestedingseisen, interne organisatie en de rol van ProRail in het faciliteren van energievoorziening via onderstations en bouwaansluitingen. Hiermee is inzicht verkregen in de ervaringen rondom ZE-toepassingen, contractvorming en de samenwerking met externe partijen zoals netbeheerders en energieleveranciers.

Daarnaast is kwantitatieve data verzameld vanuit het onderstation, waaronder laadvermogens, laadtijden en geladen energie. Deze gegevens zijn aangevuld met project-specifieke kenmerken, zoals typen materieel, accucapaciteiten en motorvermogens. Door deze dataverzameling te combineren met de kwalitatieve input uit interviews ontstaat een integraal beeld van zowel de technische prestaties als de organisatorische randvoorwaarden van emissievrij werken in deze spoorbouwcase.

6.1 Samenvatting

Laadcapaciteit en energielogistiek blijken bepalend voor de mogelijkheden van ZE-inzet op de bouwplaats. Beperkingen in de gelijktijdige laadcapaciteit - momenteel kunnen maximaal twee machines gelijktijdig snelladen - in combinatie met de afstand van de laadcontainer tot de bouwplaats (meer dan ca. één kilometer), leiden tot inefficiënties in de uitvoering. Dit uit zich in extra rijbewegingen en extra tijd. Op machine-niveau was de laadcapaciteit ruim voldoende.

Optimalisatie is mogelijk door de laadcontainer dicht bij de bouwplaats te positioneren (streefwaarde ruim onder ≤ 500 meter) of door het inrichten van satelliet-laadpunten of accucontainers op of direct aan de bouwplaats. Daarnaast is het vergroten van de gelijktijdige laadcapaciteit tijdens perioden met hoge laadbehoeften (zoals tijdens treinvrije perioden (TVP)) wenselijk. Dit kan bijvoorbeeld door inzet van extra snelladers of buffering via batterijcontainers, om zowel de startpiek van laden rond 15:00 uur als de TVP-piekbelasting te dempen.

Analyse van de laaddata laat zien dat “laadtags” sterk verschillen in gemiddeld laadvermogen en sessieduur. Dit wijst op uiteenlopende materieeltypen en gebruiksmomenten; een directe koppeling naar de diverse machines en voertuigen is nu echter niet te maken. Dit onderstreept het belang van eenduidige machine-identificatie om inzet, laadtijd en laadstrategie per machine goed te kunnen volgen en optimaliseren. Door tags structureel te koppelen aan vaste machine-ID's worden energiegebruik, laadtijd en vermogen per machine traceerbaar. Dit maakt een vergelijk (zoals kWh per uur per type machine) mogelijk en ondersteunt voorspellende planning voor laden op basis van State of Charge (SoC). Aanvullend helpt een dergelijk inzicht voor de energievraag in toekomstige projecten. Voorafgaand inzicht in energie- en vermogensvraag ondersteunt immers een realistische dimensionering van de benodigde laadinfrastructuur.

Tot slot beïnvloeden onzekerheden rond tariefstelling bij tractiestroom, rolverdeling en procesafspraken, evenals storingsgevoelige componenten (waaronder stroomverdelers en zogenoemde paddenstoelen), de inzetbaarheid van het systeem. Hoewel de pilot profiteerde van tijdelijke toestemming om tractiestroom voor bouwactiviteiten te gebruiken, zijn voor structurele opschaling heldere tarief- en contractkaders noodzakelijk. Het is daarom aan te bevelen om afspraken over het gebruik van tractiestroom voor spoorbouw te standaardiseren, waarbij rekening wordt gehouden met de tariefstructuur, allocatieregels en borging van prioriteit voor treinverkeer. Dit vergroot de herhaalbaarheid en maakt opschaling naar andere spoorlocaties eenvoudiger. Daarnaast is het essentieel om in een vroeg stadium met netbeheerder en energieleverancier afstemming te zoeken over de benodigde energie-infrastructuur.

Tegelijkertijd leert de pilot dat deze wijze van laadvoorzieningen creëren dermate complex en kostbaar is, dat het de vraag oproept of dit een oplossing is die vaker toegepast moet worden. In uitzonderingsgevallen is dit een optie, maar voor het gros van de spoorbouwprojecten zijn er waarschijnlijk eenvoudiger en/ of minder kostbare laadoplossingen.

6.2 Specificaties van het elektrisch materieel in Vught

Binnen het project in Vught worden diverse typen ZE-materieel ingezet. De focus ligt hierbij op het materieel wat laadt bij het onderstation. Het betreft daarbij een knijperauto, een bandenkraan en een middelzware en zware krol.

Het motorvermogen van de elektrische bandenkraan en krollen liggen tussen de 95 en 150 kW. De elektrische vrachtauto's hebben een aanzienlijk hoger vermogen van ongeveer 350 kW. De accu-capaciteit van de krollen ligt tussen de 240 en 360 kWh. De bandenkraan beschikt over een accu-capaciteit van ca. 400 kWh. Voor de elektrische vrachtwagens varieert de accu-capaciteit tussen de 350 en 500 kWh.

6.3 Omschrijving laadinfrastructuur

In Vught is een laadplein gerealiseerd waarbij een laadcontainer met transformator is gekoppeld aan een ProRail-onderstation. Deze installatie zet tractiestroom om naar een geschikt spanningsniveau voor het laden van elektrisch bouwmaterieel. Via krachtige snelladers met meerdere laadpunten kunnen twee machines worden opgeladen met 120 kW laadvermogen. Losse accu's kunnen geladen worden met 180 kW en een batterijcontainer kan geladen worden met maximaal 360 kW. De gemiddelde laadtijd van machines is ongeveer drie uur. Losse accu's kunnen in ca. anderhalf uur worden geladen.

De aanpak biedt een oplossing voor de huidige beperkingen met het elektriciteitsnet door netcongestie. Door gebruik te maken van een spooraansluiting kan, ondanks netcongestie, toch voldoende laadcapaciteit worden gerealiseerd. Voor deze pilot is toestemming verkregen van de Autoriteit Consument en Markt (ACM) om tractiestroom tijdelijk ook voor bouwactiviteiten te benutten, waarbij is geborgd dat de energievoorziening voor het treinverkeer niet in het geding komt. De laadvoorziening is het resultaat van een nauwe samenwerking tussen BAM en ProRail.

In het spoorproject wordt, naast de laadcontainer, ook gebruikgemaakt van reguliere netspanning (via vier bouwaansluitingen van 3×80A in de nabijheid van de bouwplaats). Via de laadcontainer is snelladen mogelijk, terwijl de bouwaansluitingen vooral worden ingezet voor regulier laden. Met name tijdens treinvrije perioden (TVP's) is snelladen essentieel. Daarnaast wordt de bouwplaats ondersteund door externe batterijcontainers, welke ook geladen kunnen worden bij de laadcontainer.

Het laden van de machines vindt plaats via laadtags. De huidige laadpaal is uitsluitend te gebruiken met projectspecifieke tags, waarvan er vier in omloop zijn. In principe laadt elke machine steeds met dezelfde tag, maar bij storingen worden tags soms onderling uitgewisseld. Dit maakt het correct herleiden van laadgegevens per machine lastig.



Figuur 6.1: Laden bij het onderstation in Vught: Bron: ProRail: [Primeur in Vught | ProRail](#).

6.4 Ervaringen en leerpunten uit de pilot

Tijdens de pilotfase zijn diverse lessen geleerd. In de praktijk blijkt dat het organiseren van deze infrastructuur, net als voor reguliere bouwaansluiting, voorbereidingstijd vergt (ca. een half jaar).

Voor stroom uit ProRail-installaties bestaat nog onduidelijkheid over tariefstelling, aangezien ProRail geen stroom mag verkopen, maar wel mag inzetten van eigen gebruik. ProRail onderzoekt op dit moment de beste manier om hiermee om te gaan in het kader van bouwprojecten.

Een essentieel leerpunt is de locatie van de laadcontainer. Nabijheid tot de bouwplaats bepaalt in sterke mate de efficiëntie en mate van gebruik. Rijden naar laadpunten kost energie, tijd en geld. Vanuit de praktijk wordt een afstand van minder dan 500 meter als randvoorwaardelijk beschouwd (liefst nog fors minder), bij voorkeur met laadvoorzieningen direct op of naast de bouwplaats. De laadcontainer stond in dit geval op iets meer dan een kilometer afstand van de bouwplaats. Vanuit logistiek oogpunt bleek het inefficiënt om machines heen en weer te rijden; laden op de bouwplaats zelf, eventueel met accucontainers, heeft duidelijk de voorkeur.

Voor een continue 24/7-planning is het gebruik van uitwisselbare accu's essentieel gebleken. De combinatie van een aansluiting op een onderstation met een in- en uitzetplaats voor materieel wordt als zeer geschikt ervaren. Tijdens TVP's is echter extra accucapaciteit nodig om meerdere machines gelijktijdig te kunnen laden. In de huidige situatie kunnen maximaal twee machines tegelijk laden, wat knelpunten oplevert wanneer bouwplaats en laadfaciliteit meerdere kilometers uit elkaar liggen.

6.4.1 Analyse van barrières en succesfactoren

Op basis van de case Vught en de interviews kunnen de volgende primaire barrières worden onderscheiden:

- Energievoorziening en kosten: onduidelijkheid over tarieven bij tractiestroom, energiebelasting bij reguliere aansluitingen en het feit dat ProRail geen stroom mag verkopen. Daarnaast kunnen netcongestie en beperkte capaciteit een belemmering vormen.
- Hoge investeringskosten: met name voor koppeling van laadpunten aan onderstations.
- Ruimtelijke inpassing: suboptimale positionering van laadpunten leidt tot extra logistieke bewegingen; afstand tot de bouwplaats moet bij voorkeur onder de 500 meter blijven.
- Beperkte gelijktijdige laadcapaciteit: piekbelasting, vooral tijdens TVP's, is moeilijk op te vangen zonder aanvullende accucontainers of zwaardere aansluitingen.
- Organisatorische complexiteit: afstemming tussen projectorganisaties van opdrachtgever en aannemer kost veel energie. Daarnaast bestaan praktische onduidelijkheden rond toegang tot laadpunten, pasjesbeheer, storingsafhandeling, veiligheid en diefstal.
- Monitoring: onvoldoende eenduidige identificatie van machines in het laadsysteem bemoeilijkt analyse van energiegebruik per machine.

Tegelijkertijd zijn meerdere succesfactoren geïdentificeerd:

- Gebruik van externe aansluitingen naast reguliere netaansluitingen helpt om knelpunten door netcongestie te beperken.
- Combinaties van onderstation-aansluitingen met batterijcontainers (bij voorkeur direct langs het spoor) vergroten de flexibiliteit van de energielogistiek.
- Vroegtijdige contractering van stroomlevering en zakelijke afspraken over afname verminderen onzekerheid tijdens uitvoering.
- Voorafgaand inzicht in energie- en vermogensvraag, geleverd door de aannemer, ondersteunt een realistische dimensionering van de infrastructuur.
- Belonen van ZE-inzet in aanbestedingen door middel van een gunningscriterium stimuleert toepassing van emissievrij materieel.
- Strategische plaatsing van laadpunten, bij voorkeur op of direct naast de bouwplaats, verhoogt de operationele efficiëntie.
- Goede communicatie en betrokkenheid van gebruikers, gecombineerd met een praktische en creatieve aanpak vanuit de aannemer, blijken essentieel voor succesvolle implementatie.

Op basis van deze inzichten worden de volgende oplossingsrichtingen geïdentificeerd:

- Verhogen van de robuustheid van tijdelijke energie-infrastructuur.
- Strategische positionering van laadpunten in directe relatie tot de bouwplaats.
- Opschaling van gelijktijdige laadcapaciteit bij grotere projecten, bijvoorbeeld via extra accucontainers of zwaardere (tijdelijke) aansluitingen.
- Verbetering van datakoppeling tussen machines en laadsessies, bijvoorbeeld door vaste machine-ID's in plaats van uitwisselbare tags.
- Vroegtijdige organisatorische afstemming tussen opdrachtgever, aannemer, netbeheerder en energieleverancier, inclusief duidelijke afspraken over beheer en storingsafhandeling.

Deze maatregelen dragen bij aan het verminderen van operationele onzekerheid en vergroten de schaalbaarheid van ZE-materieel op spoorbouwplaatsen.

6.5 Analyse laadgegevens vanuit laadcontainer

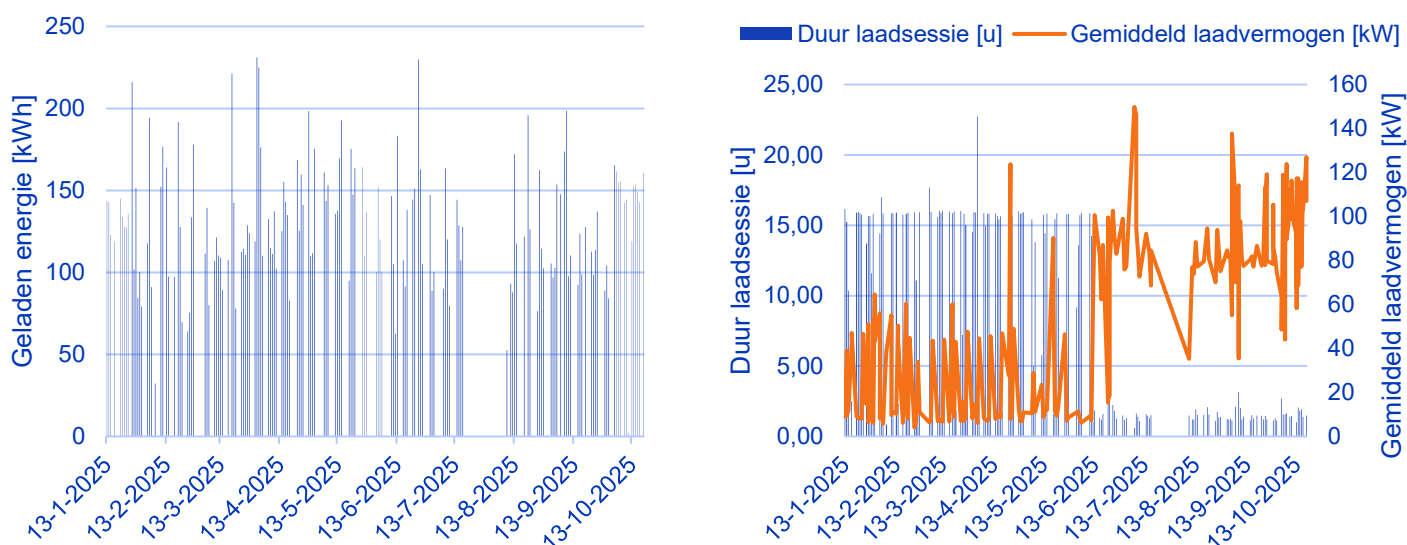
Tabel 6.1 vat alle geregistreerde laadsessies in 2025 samen, opgesplitst naar laagtags (Tag 1 t/m Tag 4 en een 'Test-tag'). Per tag worden de totale laadtijd (uren), geladen energie (kWh), het gemiddelde laadvermogen (kW) en het aantal laadsessies (#) weergegeven. Het gemiddeld laadvermogen is berekend op basis van de tijdsduur van het laden en de geladen energie. Het daadwerkelijk laadvermogen is voor deel van de tijd mogelijk afwijkend. Dit komt omdat de tijdsduur van laden in de eerste periode anders geregistreerd lijkt te zijn dan in de latere periode (zie volgende paragraaf). In totaal zijn 223 laadsessies geregistreerd in 2025, goed voor 1.366 uur laadtijd en 25.468 kWh geladen energie met een gemiddeld (berekend) laadvermogen van 55 kW. Tag 2 is het vaakst gebruikt (110 sessies) en vertegenwoordigt de meeste laadtijd en energie, maar met een relatief lager gemiddeld vermogen (± 26 kW) dan de overige tags; de 'Test-tag' heeft een beperkt aantal sessies maar een hoog gemiddeld vermogen (± 95 kW). Dit patroon duidt op verschillende gebruiksprofielen per tag (en dus per machine/gebruikssituatie), variërend van langere, lagere-vermogen-sessies (mogelijk nacht) tot kortere, hogere-vermogen-sessies.

Tabel 6.1: Overzicht van laadgegevens per tag over 2025.

Tag	Laadtijd [uren]	Energie [kWh]	Gemiddeld berekend laadvermogen [kW]	Laad-sessies [#]
Tag 1	74	6.110	80	59
Tag 2	1.154	13.666	26	110
Tag 3	15	412	62	5
Tag 4	89	2.162	76	18
Test-tag	34	3.118	95	31
Totaal	1.366	25.468	55	223

De linkergrafiek in Figuur 6.2 toont per kalenderdag de geladen energie (kWh) per laadsessie. In sommige gevallen zijn er meerdere laadsessies per dag. De geladen energie per sessie ligt vaak tussen de 100 en 150 kWh (hierover later meer). De periode eind oktober was vrij intensief; in deze periode was ook een TVP, wat dit mogelijk verklaart. De bouwvakperiode in de zomer is duidelijk herkenbaar met geen inzet-/laadgegevens.

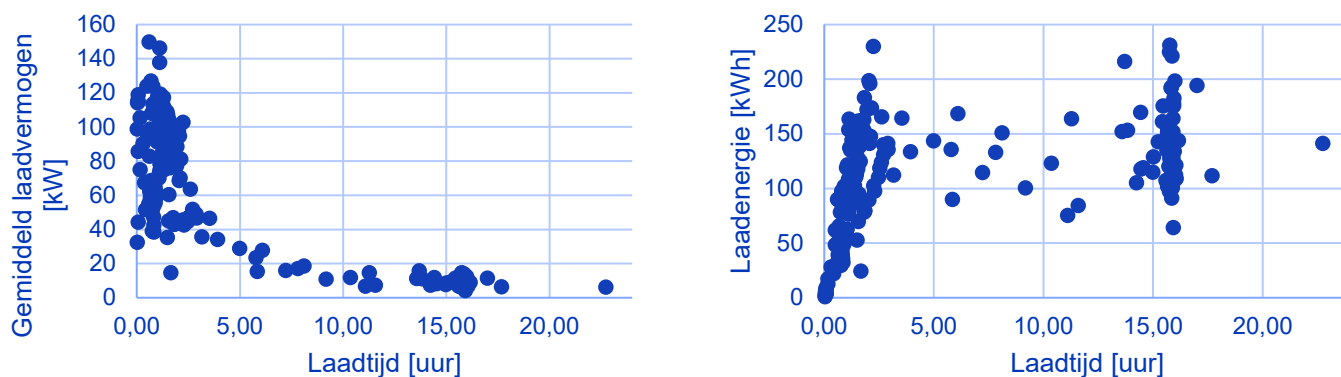
De rechtergrafiek plaatst sessieduur (uren) naast het gemiddelde berekende laadvermogen (kW) op diezelfde kalenderdagen. Het gemiddeld laadvermogen is bepaald door de totale geladen energie te delen door de laadsessietijd. (Mede) hierdoor hebben kortere sessies vaak hogere berekende laadvermogens en langere sessies lagere gemiddelde berekende laadvermogens. Opvallend is dat het eerste halfjaar de laadsessies vaak ca. 15 uur duurden, met relatief lage gemiddelde laadvermogens tot gevolg (ca. 20 kW gemiddeld) en dat het tweede halfjaar een omgekeerd beeld laat zien (ca. 90 kW gemiddeld). Het is niet bekend of dit een proceswijziging is geweest in de operatie (actief loskoppelen einde sessie), of een wijziging in het systeem die de sessietijd bepaald. Het berekende laadvermogen lijkt daarmee niet accuraat, met name in de eerste periode.



Figuur 6.2: Geladen energie [kWh] per laadsessie per kalenderdag (links) en duur laadsessie met gemiddeld laadvermogen per kalenderdag (rechts).

Figuur 6.3 laat de relatie tussen laadsessieduur en intensiteit zien, links in de vorm van gemiddeld berekend laadvermogen en rechts in de vorm van laadenergie. Beide figuren laten twee dominante vormen van laadsessies zien; sessies tot 3 uur, vaak met hoge vermogens, en sessies van ruim 15 uur met lagere vermogens. In beide sessies kan de geladen energie hoog zijn. De korte sessies laten ook lagere waarden voor geladen energie zien die de langere sessies niet laten zien.

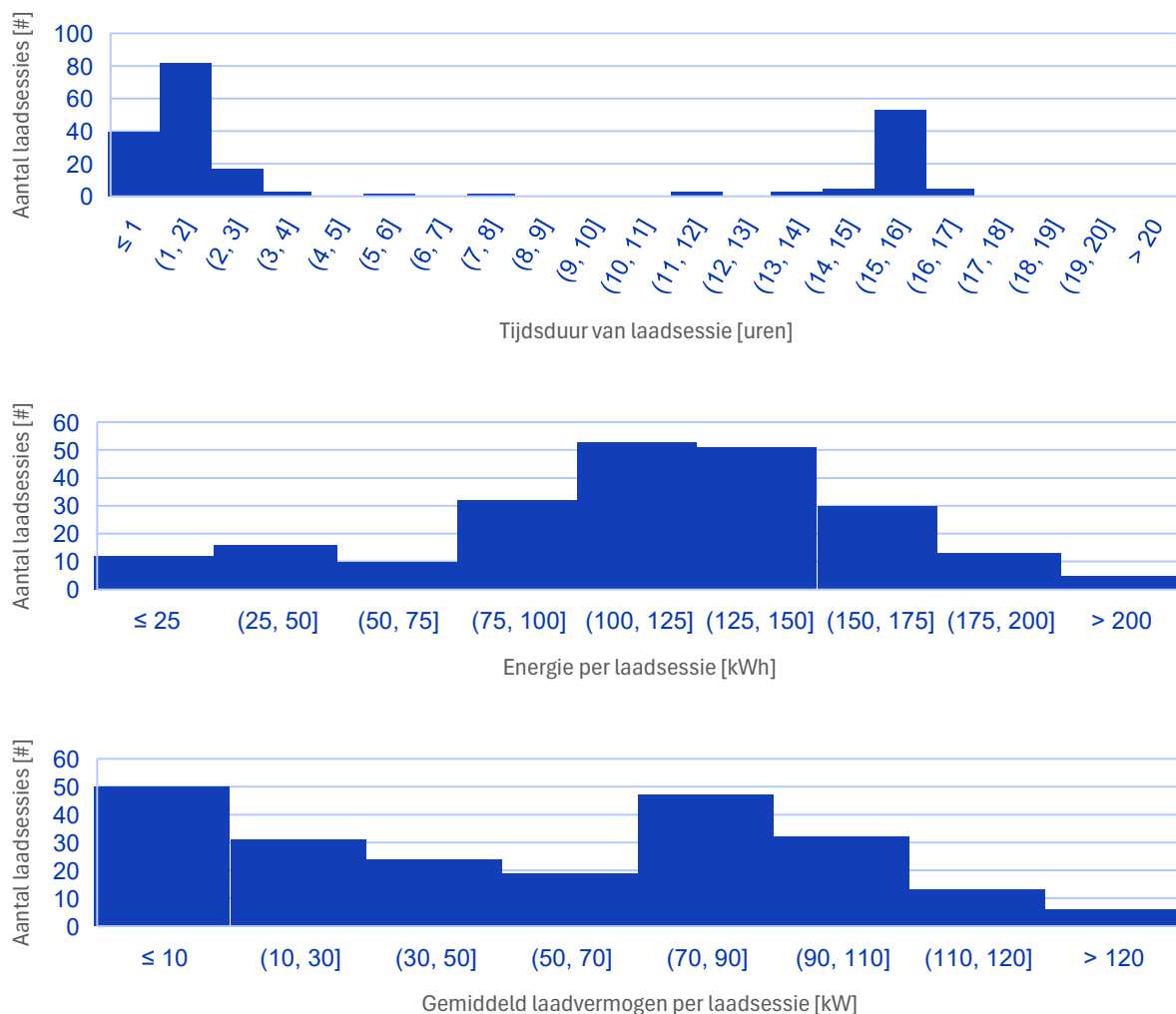
De duurverdeling is, zoals hierboven al geobserveerd, bi-modaal van karakter: veel lange sessies (± 15 uur) die in de nacht plaatsvinden en daarnaast kortere sessies (0,5-2,5 uur). De vermogensverdeling laat zowel hoge vermogens (snelladen) als gematigde vermogens (regulier laden) zien. Men zou vermoeden dat de lagere sessieduur met hogere vermogens veelal tussentijds bijladen is, en de langere sessieduren vooral einde werkdag-aansluitingen zijn. Qua starttijd van laden is er echter nauwelijks verschil, zie Figuur 6.5. Ruim 60% van de laadsessies start tussen 15:00u en 16:00u, met nog een deel daaromheen. Het lijkt erop dat er met name aan het einde van werkdag wordt geladen. Mogelijk is een deel tussentijds bijladen gedurende dag, maar dat is niet te herkennen als patroon.



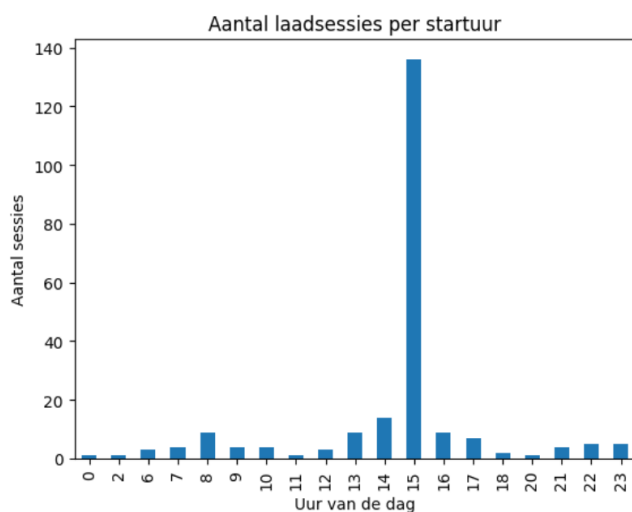
Figuur 6.3: Gemiddeld laadvermogen [kW] (links) en Laadenergie (rechts) als functie van de laadsessietijd [uur].

De drie histogrammen in Figuur 6.4 tonen de verspreiding van tijdsduur, energie en gemiddeld laadvermogen per laadsessie. De meest voorkomende bijgeladen energie ligt tussen de 100 en 150 kWh. Sessies van meer dan 200 kWh bijladen komen nauwelijks voor. De accucapaciteit van het materieel ligt tussen de 240 en 500 kWh. Dat betekent dat de machines/voertuigen meestal niet volledig ontladen worden en dat het energie-aanbod voldoende is. Om een beter beeld te verkrijgen van de energievraag per machine/voertuig dient er een betere koppeling gemaakt te worden tussen het materieel en de laadvoorziening.

In Bijlage A is de analyse op het laadprofiel van deze case verder uitgewerkt door ElaadNL. Onderdeel van de analyse is onder andere hoe “slim laden” in deze case toegepast zou kunnen worden. De nadere analyse in Bijlage A is volledig uitgevoerd door ElaadNL en in presentatievorm gedocumenteerd.



Figuur 6.4: Histogrammen van respectievelijk tijdsduur van laadsessies [uren], energie per laadsessie [kWh] en gemiddeld laadvermogen per laadsessie [kW], van boven naar beneden.



Figuur 6.5: Tijdstip van start laadsessies.

7 Cross-case analyse

In dit hoofdstuk is voor 80 verschillende bouwprojecten het benodigde laadvermogen en de energievraag ingeschat. Deze is vervolgens vergeleken met de potentiële beschikbare energievoorzieningen.

7.1 Samenvatting

De inventarisatie laat zien dat de energievraag en het benodigde laadvermogen sterk verschillen per sector en projecttype. Lichte GWW-activiteiten (zoals bouwrijp maken, bestraten en herinrichting) hebben een relatief lage dagelijkse energievraag. Hierdoor is een standaard 3x80A-bouwaansluiting vaak voldoende. B&U-projecten vragen meer energie. In de meeste gevallen volstaat een 160 kW-aansluiting. De grootste uitdagingen liggen bij zware buitenstedelijke GWW-sectoren zoals kust en oever, railbouw en asfalt, die door hoge gemiddelde energiebehoeften (1-10 MWh/dag) ook hoge laadvermogens nodig hebben. Voor deze projecten zijn veelal grotere aansluitingen dan 160 kW nodig, al dan niet aangevuld met bufferaccu's en slim laadmanagement.

7.2 Energie- en vermogensvraag bouwplaatsen

De inventarisatie van bouwplaatsen is tot stand gekomen via verschillende kanalen, waaronder via opdrachtgevers en opdrachtnemers en via AERIUS-berekeningen. De analyse richt zich primair op mobiele werktuigen. Logistieke activiteiten zijn in deze fase buiten beschouwing gelaten, aangezien deze niet noodzakelijkerwijs op de bouwplaats zelf plaatsvinden of daar hoeven te laden.

Het doel van deze inventarisatie is om voor een zo groot mogelijk aantal projecten het benodigde vermogen en de energievraag in kaart te brengen, en deze vervolgens te vergelijken met de potentiële beschikbare energievoorzieningen.

Per project zijn de volgende gegevens verzameld en/of afgeleid: projecttype, type ingezette machines, maximaal motorvermogen, het aantal inzeturen per dag en het totale aantal inzetdagen binnen het project. Waar van toepassing is tevens onderscheid gemaakt tussen verschillende projectfasen.

De projecttypen zijn gecategoriseerd conform de indeling die wordt gehanteerd binnen de Emissieregistratie. Aanvullend is onderscheid gemaakt tussen binnenstedelijke en buitenstedelijke projecten, evenals tussen kleine, middelgrote en grote projecten. Deze schaalindeling is gebaseerd op het aantal ingezette machines in combinatie met hun motorvermogen. Kleine projecten omvatten minder dan vijf machines, middelgrote projecten minder dan negen machines en grote projecten negen machines of meer. Indien binnen een project machines met uitzonderlijk hoog of laag motorvermogen aanwezig zijn, kan deze categorisering hiervan afwijken.

Wanneer het aantal inzeturen per dag niet bekend was, is dit geschat op zes of acht uur per dag, afhankelijk van het type machine.

De motorbelasting, die bepalend is voor de totale energievraag, is per machinetype ingeschat op basis van dezelfde methodiek als toegepast binnen de Emissieregistratie.

Op basis van het motorvermogen, de belastingsgraad en het aantal inzeturen is per machine de benodigde energie per dag en per project berekend. Bij de bepaling van de totale energievraag en het benodigde laadvermogen is aanvullend rekening gehouden met aandrijflijnverliezen, laadverliezen, een extra veiligheidsmarge en een beschikbare laadtijd van 14 uur.

Voor de aggregatie naar projectniveau (meerdere machines gezamenlijk) is aangenomen dat niet alle machines gelijktijdig in gebruik zijn. De machine met de hoogste inzetduur binnen het project of de projectfase is als referentie genomen. De inzet van de overige machines is vervolgens proportioneel geschaald op basis van hun totale inzetdagen. Bijvoorbeeld: indien de machine met de hoogste inzet 50 dagen actief is en drie andere machines elk 25 dagen, dan is voor deze drie machines een dagfactor van 0,5 toegepast. Deze benadering vormt een vereenvoudiging van de praktijk, aangezien de daadwerkelijke gelijktijdigheid van machine-inzet niet is geregistreerd.

De resulterende energie- en laadvermogensvraag is vervolgens vergeleken met mogelijk beschikbare netaansluitingen (zie onderstaande tabel), evenals met de mogelijkheden voor inzet van aanvullende batterijcontainers.

Tabel 7.1: Mogelijke aansluitingen met totale beschikbare energie per dag [kWh/dag]

Type aansluiting	Aansluitwaarde [kW]	Beschikbare energie bij Nacht_laden (14u) [kWh/dag]	Beschikbare energie via bufferaccu's [kWh/dag]
Bouwaansluiting_laagspanning (1x: 3x80A)	55	773	1.126
Medium grote aansluiting	160	2.240	3.264
Grote aansluiting met transformator	600	8.400	12.240

7.2.1 Overzicht in kaart gebrachte bouwplaatsen

Tabel 7.2 bevat een overzicht van de tachtig bouwplaatsen die zijn verzameld, uitgesplitst naar sector, binnen-/buitenstedelijk en projectgrootte. De verdeling laat zien dat een groot deel van de onderzochte projecten afkomstig is uit de GWW-sector, met maar liefst 66 projecten, terwijl de B&U-sector 14 projecten vertegenwoordigt. De verzamelde B&U-projecten zijn uitsluitend binnenstedelijk en vallen vooral onder de categorie 'groot'. De verzamelde GWW-projecten kennen een bredere spreiding over groot, medium en klein en beslaan zowel binnen- als buitenstedelijke projectlocaties.

Tabel 7.2: Beschikbare bouwplaatsen, gecategoriseerd naar sector, binnen- en buitenstedelijk en klein, medium, groot.

Sector en subsector	Binnenstedelijk			Buitenstedelijk		Totaal
	Groot	Medium	Klein	Groot	Medium	
B&U	10	4				14
Utiliteitsbouw - nieuw	1	2				3
Woningbouw - nieuw	9	2				11
GWW	8	23	26	7	2	66
Bouwrijp maken		6	4			10
Civiele kunstwerken	1			2		3
Kabels en pijpleidingen		3	2			5
Kust en oever	2			3		5
Railbouw				1	1	2
Wegenbouw - asfalt	3	4	1	1	1	10
Wegenbouw - bestraten		4	8			12
Wegenbouw - herinrichting	2	6	11			19
Totaal	18	27	26	7	2	80

7.2.2 Energievraag in kaart gebrachte bouwplaatsen

Tabel 7.3 laat de gemiddelde energievraag per type bouwproject zien, uitgedrukt in kilowattuur per dag. Indien een bouwproject meerdere fasen heeft, is de gemiddelde energievraag per fase weergegeven, ervan uitgaande dat projectfasen niet parallel lopen. Belangrijk om te noemen is dat de statistiek over de verschillende typen bouwplaatsen beperkt is.

De geïnventariseerde binnenstedelijke utiliteitsbouw kennen hoge dagelijkse energiebehoeften, tot 1.423 kWh voor middelgrote projecten. De grote projecten laten een lagere waarde zien, dit komt door meerdere fasen in het project. In de GWW-sector lopen de waarden sterk uiteen; buitenstedelijke projecten zoals kust- en oeverwerken kunnen oplopen tot ruim 7.600 kWh per dag, terwijl kleine binnenstedelijke herinrichting gemiddeld ca. 200 kWh/dag is.

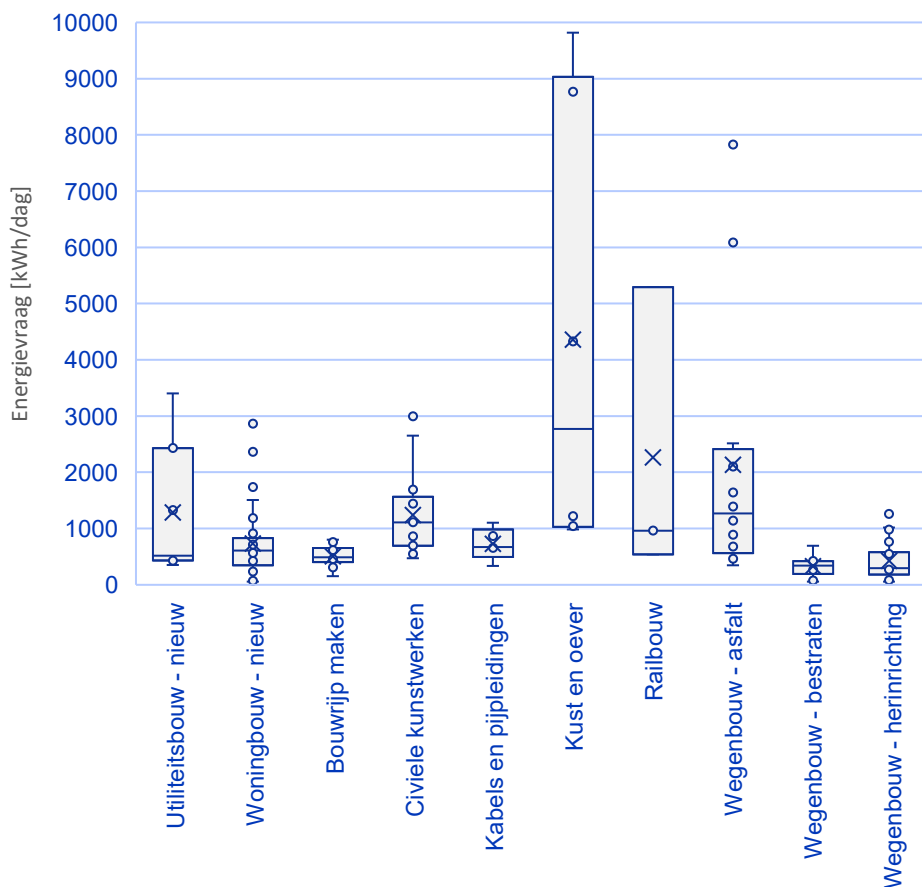
Tabel 7.3: Gemiddelde gevraagde energie per dag per type bouwproject [kWh/dag]

Sector	Binnenstedelijk			Buitenstedelijk	
	Groot	Medium	Klein	Groot	Medium
Utiliteitsbouw - nieuw	1.175	1.423			
Woningbouw - nieuw	767	528			
Bouwrijp maken		618	338		
Civiele kunstwerken	628			1.421	
Kabels en pijpleidingen		767	661		
Kust en oever	1.079			7.637	
Railbouw				5.290	751
Wegenbouw - asfalt	1.165	763	172	3.534	2.099
Wegenbouw - bestraten		455	267		
Wegenbouw - herinrichting	780	692	212		

Figuur 7.1 is een boxplot-overzicht van de energievraag per dag (kWh/dag) voor verschillende projecttypen/sectoren. Dit figuur laat niet alleen de gemiddelde benodigde energie zien, maar vooral de variatie tussen de verschillende projecten binnen de betreffende sector. In elke boxplot geldt:

- de box geeft het middendeel van de data weer (de “typische bandbreedte” waarin veel projecten vallen),
- de horizontale lijn in de box is de mediaan (middenwaarde),
- de whiskers geven de spreiding buiten de box weer,
- losse punten boven de whiskers zijn uitschieters,
- het kruisje (x) markeert het gemiddelde van de sector.

De figuur maakt zichtbaar dat sommige sectoren/werkzaamheden een relatief stabiel en laag energieprofiel hebben (zoals bouwrijp maken, bestraten en herinrichting). Terwijl andere sectoren juist een brede variatie laten zien met zeer hoge uitschieters, met name kust- en railbouw. Belangrijke notitie hierbij is dat het aantal projecten per sector beperkt is. Daarmee laat het figuur zien waarom gemiddelden alleen niet voldoende zijn voor dimensionering: in sectoren met grote spreiding kan de benodigde energie ver boven het “typische” niveau liggen.



Figuur 7.1: Spreiding van gevraagde energie [kWh] per dag per sector

De inventarisatie laat zien dat de energievraag op bouwplaatsen sterk varieert per sector, grootte en locatie. Binnenstedelijke B&U-projecten (met name utiliteitsbouw) kennen hogere gemiddelde waarden (orde 0,5-3,8 MWh/dag) dan lichte GWW-activiteiten, maar vertonen minder extreme uitschieters dan de zwaarste GWW-categorieën. In de GWW-sector lopen de gemiddelden uiteen van lage en stabiele profielen (bouwrijp maken, bestraten, herinrichting; doorgaans <0,8 MWh/dag) tot zware profielen (kust en oever, civiele kunstwerken buitenstedelijk, railbouw en een deel van asfalt), waar gemiddelden van 1-10 MWh/dag en brede spreiding voorkomen. Bij kust en oever en railbouw toont de spreidingsgrafiek de grootste bandbreedte. Een inschatting van de benodigde energie op basis van het gemiddelde is daar risicovol.

Op basis hiervan kan ook een vergelijk worden gemaakt met potentiële aansluitingen. Uitgaande van 14 uur beschikbare laadtijd, levert een 55 kW (3x80A) bouwaansluiting ca. 773 kWh/dag (met bufferaccu's 1.126 kWh/dag). Energetisch is dat voldoende voor de lichte GWW werken (met beperkte marge). De 160 kW-aansluiting (2.240 kWh/dag; 3.264 met buffer) dekt een groot deel van de middenklasse (o.a. B&U, civiele kunstwerken, wegenbouw-asfalt binnenstedelijk). Voor zware buitenstedelijke projecten (kust en oever groot, rail groot, asfalt groot) is vaak een 600 kW trafo-aansluiting nodig (8.400 kWh/dag; 12.240 met buffer).

Samengevat: lichte GWW kan veelal met standaardoplossingen, B&U vraagt zekere capaciteitsborging, en zware GWW vereist zwaardere aansluitingen, bufferaccu's en slim laden om pieken en spreiding robuust op te vangen.

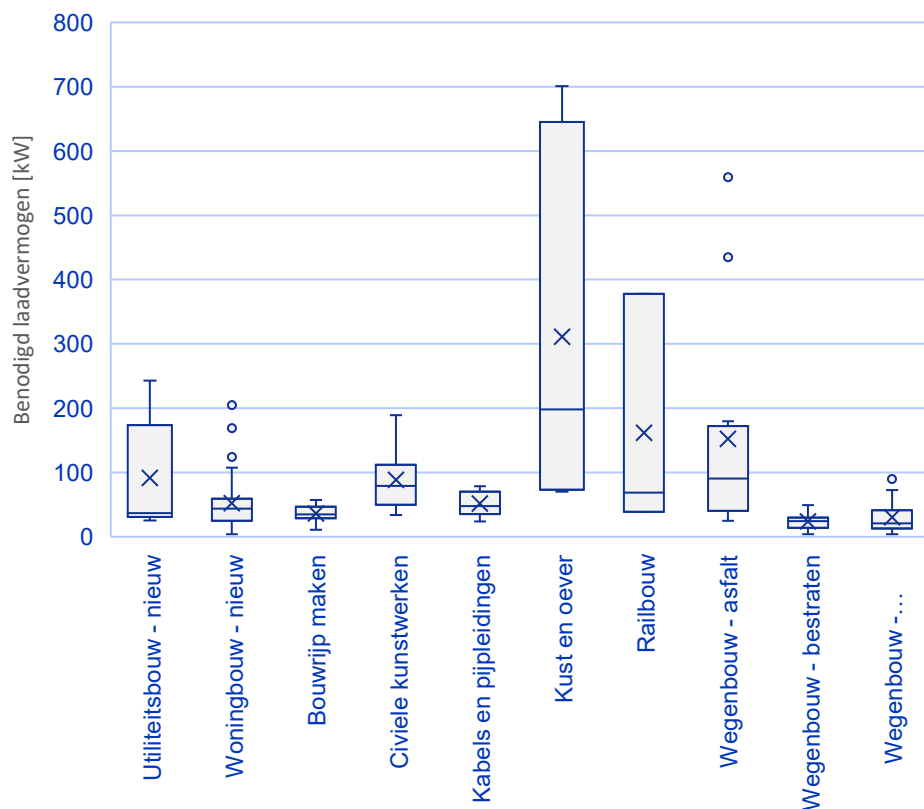
7.2.3 Vermogensvraag in kaart gebrachte bouwplaatsen

In aanvulling op de eerdere tabellen waarin de energievraag per dag (kWh/dag) per projecttype is weergegeven, laten Figuur 7.2 en Tabel 7.4 zien hoeveel laadvermogen (kW) gemiddeld nodig is om die dagelijkse energie binnen de beschikbare laadtijd (meestal 14 uur) in de machines te kunnen laden.

De tabel en figuur laten zien dat sectoren met hoge of sterk variërende energievraag - zoals kust en oever, railbouw en asfalt buitenstedelijk - ook duidelijk hogere gemiddelde vermogens nodig hebben om het materieel tijdig op te laden. Omgekeerd blijkt bij lichte GWW-activiteiten dat zowel energiegebruik als benodigd vermogen laag en voorspelbaar zijn, waardoor deze groepen doorgaans met een standaard bouwaansluiting kunnen volstaan.

Tabel 7.4: Gemiddelde gevraagd laadvermogen per dag per type bouwproject [kW]

Sector	Binnenstedelijk			Buitenstedelijk	
	Groot	Medium	Klein	Groot	Medium
Utiliteitsbouw - nieuw	84	102			
Woningbouw - nieuw	55	38			
Bouwrijp maken		44	24		
Civiele kunstwerken	45			102	
Kabels en pijpleidingen		55	47		
Kust en oever	77			545	
Railbouw				378	54
Wegenbouw - asfalt	83	54	12	252	150
Wegenbouw - bestraten		32	19		
Wegenbouw - herinrichting	56	49	15		



Figuur 7.2: Spreiding van gevraagd laadvermogen [kW] per dag per sector

In Bijlage B volgt een detailanalyse van vijf uiteenlopende bouwplaatsen en hun energievoorziening door Skoon Energy. Aan de hand van energieprofielen is beschreven met welke emissie-arme of emissieloze energieoplossingen invulling gegeven kan worden aan de energievraag. Aanvullend is beschreven wat bij die oplossingen en typen projecten barrières en succesfactoren zijn. Ook is een inschatting van de verwachte kosten per kWh gegeven. De analyse in Bijlage B is volledig uitgevoerd door Skoon Energy en in een rapportage gedocumenteerd.

8 Interviewresultaten

In dit hoofdstuk worden de interviewresultaten beschreven die zijn gehouden rondom de ervaringen met emissieloos bouwen. Er zijn interviews gehouden met opdrachtnemers (18), opdrachtgevers (8) en partijen die betrokken zijn bij energielevering (2). De meeste interviews zijn uitgevoerd tussen kwartaal 1 en 3 van 2025. De focus van de interviews was om de barrières en succesfactoren in kaart te brengen van emissieloos bouwen. Deze inzichten worden gebruikt om de bevindingen uit de praktijkcases binnen TRANSENERGY te duiden, te verdiepen en te plaatsen in een bredere context. Op deze manier vormen de interviews een aanvulling op de case-analyses en de cross-case analyse en dragen zij bij aan de uiteindelijke conclusies en aanbevelingen.

8.1 Samenvatting

Zero-emissie bouwen is technisch haalbaar, maar organisatorisch en logistiek complexer dan conventioneel bouwen. De belangrijkste knelpunten liggen niet bij de techniek, maar bij voorbereiding, energielogistiek, samenwerking en duidelijke opdrachtgeverseisen.

ZE-materieel functioneert goed onder de juiste randvoorwaarden. Met voldoende accucapaciteit, wisselaccu's en een slimme laadstrategie kan het betrouwbaar worden ingezet. Hierbij zijn er duidelijke voordelen voor werkomgeving en gezondheid. De energievoorziening vormt het grootste structurele knelpunt door lange doorlooptijden, netcongestie en gebrek aan standaardisatie. De uitvoerbaarheid van projecten verbetert sterk door vroeg in het proces energiescans uit te voeren, benutting van bestaande aansluitingen in de omgeving (al dan niet via flexibele contracten (zoals tijdgebonden contracten)), laadpleinen en een mix van laadopties. Onvoldoende standaardisatie van laadprotocollen en gebrek aan inzicht in werkelijke energiebehoefte leiden tot inefficiënt laden en onnodige kosten. Opdrachtgevers spelen een belangrijke rol in het proces. Onduidelijke of inconsistente ZE-eisen, zonder inzetgaranties of kostenvergoeding, remmen investeringen. Terwijl duidelijke uitvragen, meerjarige zekerheid en gedeelde verantwoordelijkheid de transitie juist versnellen. In de uitvoering vraagt ZE-bouwen om nieuwe werkwijzen, waarin laadplanning, strategische plaatsing van laadpunten en spreiding van werkzaamheden productieverlies kunnen beperken. Tot slot spelen kennis, cultuur en samenwerking een belangrijke rol. Weerstand en onbekendheid vormen belemmeringen, terwijl geïnformeerde teams, met een creatieve en pragmatische aanpak ZE-projecten uitvoerbaar maken. Een betrokken en positief management helpt hierbij. In stikstofgevoelige gebieden fungeert ZE als versneller doordat vergunningverlening eenvoudiger wordt.

Aanbevolen wordt om de inzetbaarheid van materieel te vergroten door vooraf accubehoeftes en typen machines goed te bepalen. Daarnaast is het van belang om energievoorziening als kernonderdeel van projectvoorbereiding te organiseren. Onder andere via vroege energiescans, benutting van bestaande aansluitingen en vaste beslisstrategieën rondom laadopties. Monitoring van energiegebruik helpt bij het optimaliseren van aansluitwaarden, laadmomenten en kosten. Versnelling van standaardisatie van materieel en laadinfra vermindert compatibiliteitsproblemen en kosten. Opdrachtgevers dienen duidelijke, realistische ZE-uitvragen te formuleren, meerkosten (deels) te vergoeden en zekerheid te bieden via meerjarige inzetgaranties en gunningsvoordelen. Het faciliteren van laadinfrastructuur door opdrachtgevers kan ook helpen.

Daarnaast is aanpassing van planning en werkmethoden noodzakelijk om productieverlies te beperken. Investeren in kennis, training, samenwerking en cultuurverandering helpt organisaties om ZE-werken structureel te borgen. Tot slot is het waardevol om de maatschappelijke voordelen van ZE-bouwen actief te benutten voor draagvlak en vergunningverlening.

8.2 Geïnterviewde partijen

De interviews bestonden grofweg uit drie hoofdonderdelen. Eerst zijn de projectkenmerken van het betreffende bouwproject besproken, daarna is ingegaan op de barrières rondom ZE-bouwen en daarna op de succesfactoren van ZE-bouwen, al dan niet gerelateerd aan de projectkenmerken. De onderstaande paragrafen zijn op dezelfde manier opgebouwd. Voor de opdrachtgevers en energie-aanbieders was er geen focus op specifieke projecten (hooguit op een segment); het deel projectkenmerken is daarom niet of beperkt opgenomen voor deze groepen.

Opdrachtnemers

Tabel 8.1 geeft weer over welke typen projecten de geïnterviewde opdrachtnemers hebben gesproken, in totaal zijn dit er 18. Naast het type project is ook een verdeling gemaakt naar binnen- en buitenstedelijke projecten alsook naar omvang (klein, medium, groot). De omvang is bepaald op basis van het aantal machines op de bouwplaats. Kleine projecten zijn gedefinieerd als projecten met minder dan 5 machines, grote projecten meer dan 10 machines en medium daartussenin.

Het overzicht laat zien dat GWW-projecten het meest vertegenwoordigd zijn geweest tijdens de interviews. Binnenstedelijk waren dit vooral kleine tot middelgrote projecten in wegenbouw, rail, kabels en leidingen en kunstwerken. Buitenstedelijk waren dit vooral grotere projecten in de waterbouw, wegenbouw en grondwerken. Binnen de B&U-sector zijn twee kleine utiliteitsbouwprojecten binnenstedelijk besproken en één groot utiliteitsproject buitenstedelijk.

Tabel 8.1: Overzicht van de 18 projecten waar aannemers over geïnterviewd zijn.

Type project		Binnenstedelijk			Buitenstedelijk		
		Klein	Medium	Groot	Klein	Medium	Groot
B&U	Woningbouw						
	Utiliteitsbouw	2					1
GWW	Wegenbouw	2	1				1
	Kunstwerken	1					
	Kabels en leidingen		1		1		
	Waterbouw						4
	Railbouw	1		1			
	Grondwerken				1	1	

Opdrachtgevers

Er zijn interviews gehouden met vier grote gemeenten en vier verschillende Rijksdiensten. De onderzochte bouwplaatsen variëren van wegenbouw tot gebouwgebonden projecten en grote dijkversterkingsoperaties.

8.3 Projectkenmerken

Zoals hiervoor benoemd dekken de geïnterviewde partijen een breed spectrum bouwprojecten af, met name binnen de GWW-sector. Het gaat daarbij onder meer om dijkversterkingen, wegwerkzaamheden, kade- en brugrenovaties, spoorprojecten, rioleringsvervanging en bodemsanering. Daarnaast zijn er enkele specialistische projecten, zoals werkzaamheden binnen industriële installaties. Grondwerk is de meest voorkomende activiteit, gevolgd door verhardings- en asfaltwerk en rioleringswerk. De projecten variëren sterk in looptijd: van enkele maanden tot meerjarige dijk- en railprojecten. De omvang verschilt eveneens; sommige projecten draaien met minder dan vijf machines, terwijl grotere projecten meer dan tien machines dagelijks inzetten.

De bevroegde gemeenten richten zich met name op publieke werken, waaronder civiele projecten, wegenbouw en groenonderhoud. Binnen de Rijksdiensten betreft het wegenbouw en civiele kunstwerken, gebouwbeheer en dijkversterking. Hoewel de context verschilt, zijn de ambities richting emissieloos bouwen vergelijkbaar.

Deze brede mix laat zien dat emissieloos werken inmiddels in veel subsectoren van de bouwsector voorkomt.

8.3.1 Mate van en motivatie ZE-bouwen

Opdrachtnemer

Het gerealiseerde aandeel ZE verschilt sterk per project. Sommige projecten komen niet verder dan 5-20% ZE vanwege 24/7 zware werkzaamheden. Anderen zitten tussen de 30-100% ZE vanwege contractuele verplichtingen of eigen ambities. Hogere aandelen ZE zijn vaak gedreven door aanbestedingseisen of doordat het project bijvoorbeeld wordt ingezet als pilot.

De motivatie voor emissieloos werken is een combinatie van externe en interne factoren. Extern spelen aanbestedingseisen van opdrachtgevers, zoals gemeenten, Rijkswaterstaat, ProRail en waterschappen, een belangrijke rol. Aanvullend wordt als externe motivatie stikstofruimte genoemd, alsook SEB-convenanten en langdurige innovatiepartnerschappen. Intern zien bedrijven in sommige gevallen voordelen in lagere operationele kosten, meer bedrijfszekerheid, strategische profilering en toekomstbestendige investeringen richting duurzaamheidsdoelstellingen.

Opdrachtgever

De ambities lopen uiteen, maar veel organisaties streven naar een volledig emissieloze uitvoering in 2030. Gemeenten passen ZE vooral toe bij klein materieel of kleinere projecten. Rijksdiensten bevinden zich overwegend rond 30-40% ZE, met incidentele projecten die volledig ZE worden uitgevoerd. Een aantal gemeenten hanteert momenteel het principe “ZE, tenzij”, waarbij alleen wordt afgeweken wanneer ZE-inzet realistisch niet haalbaar blijkt. Sommige organisaties baseren de ZE-ambitie onder andere op Natura2000-locaties: hier wordt 90% ZE als uitgangspunt gehanteerd. Elders wordt gewerkt met basis- of ambitieuze niveaus vanuit SEB. De mate waarin marktpartijen ZE kunnen realiseren speelt hierbij een belangrijke rol.

De belangrijkste drijfveren zijn verbetering van luchtkwaliteit, CO₂-reductie en vermindering van stikstofemissies. Veel partijen zijn ondertekenaar van het SEB-convenant en passen het ambitieuze niveau van SEB toe. Vooral Rijksdiensten met werkzaamheden in of nabij Natura2000-gebieden noemen stikstofreductie als kritieke factor.

8.3.2 Accutechnologie en energievoorziening

De inzet van elektrisch materieel is zeer divers. Zowel vaste accupakketten als wisselbare accu's worden ingezet bij de mobiele machines. Batterijcontainers spelen een cruciale rol op grote bouwplaatsen, met capaciteiten die oplopen tot meer dan 2 MWh. Ook hybride aggregaten, vaak combinaties van diesel, accu en zonnepanelen, worden regelmatig toegepast als tijdelijke oplossing. In enkele projecten wordt geëxperimenteerd met waterstofoplossingen. Naast groot materieel wordt steeds meer klein ondersteunend materieel emissieloos ingezet, inclusief elektrische bouwketen, trilplaten en pompen.

8.3.3 Laadinfrastructuur

De laadinfrastructuur op de besproken projecten kent veel variatie. De afstand tot laadpunten loopt uiteen van direct op de bouwplaats (meestal binnen 50-100 meter) tot externe laadlocaties op afstanden van 1-20 kilometer en in enkele gevallen zelfs tot 2 uur rijden (in dat laatste geval geldt dat voor de toepassing van batterijcontainers). De laadopties omvatten een mix van laden via bouwaansluitingen (veelal 3×80A), accu- of batterijcontainers (al dan niet als buffer), laden bij derde partijen, laden bij opdrachtgever (zoals laden bij gemaal) en in enkele gevallen hybride aggregaten of een waterstofgenset. Het laadvermogen varieert van lage vermogens (11-55 kW) voor klein materieel tot zware aansluitingen van 250-600 kW. Niet elk project beschikt over een bouwaansluiting; vooral kortdurende projecten of locaties met weinig voorbereidingstijd moeten uitwijken naar alternatieve laadopties. Qua hardware worden laadpalen, batterijcontainers, transformatoren, verdeelkasten, DC-laders en kabels gebruikt en daarna weer meegenomen, afhankelijk van het project.

De voorbereidingstijd voor ZE-projecten verschilt sterk. Gemeenten noemen doorgaans een periode van ongeveer één jaar tussen gunning en start. Bij Rijksdiensten kan de voorbereiding oplopen tot twee à drie jaar, mede vanwege de complexiteit van infrastructuurprojecten.

8.3.4 Kosten voor laden

De laadkosten voor emissieloos materieel variëren sterk per type aansluiting. Laden via bestaande gemeentelijke voorzieningen heeft tarieven rond €0,45-€0,50 per kWh. Bouwstroom ligt tussen de €0,25-€0,30 per kWh, met daarnaast een eenmalige aansluitbijdrage. Publieke laadpalen zijn tussen de €0,40 en €0,70 per kWh. Snelladers kunnen duurder zijn. Laden op eigen terrein is vaak het goedkoopst, soms slechts 15 cent per kWh.

8.4 Barrières

De transitie naar zero-emissie bouwen brengt aanzienlijke uitdagingen met zich mee. Vanuit de interviews zijn de belangrijkste barrières gecategoriseerd in vijf domeinen: materieel, energievoorziening, projecteisen, projectuitvoering en organisatie. Hieronder worden deze barrières samengevat. Belangrijke notitie is dat niet elke barrière voorkomt bij elk project.

8.4.1 Materieel

De flexibiliteit van ZE-materieel is lager dan bij diesel-aangedreven materieel: machines kunnen niet eenvoudig naar andere projecten worden verplaatst vanwege afhankelijkheid van laadvoorzieningen. Het is daarom moeilijker om de machines voldoende in te zetten. Daarnaast is het aanbod van ZE-machines beperkt. Dit gaat vooral om middelgroot en zwaar materieel; het aanbod in de lagere vermogensklassen neemt toe. De schaalgrootte ontbreekt mede doordat er weinig OEM-machines beschikbaar zijn, veel materieel is omgebouwd. Dit leidt ook tot verschillende laadprotocollen en systemen. Door het beperkte aanbod zijn niet altijd de juiste typen of groottes beschikbaar. Hierdoor moet bijvoorbeeld soms een te kleine of juist een te grote machine worden ingezet. In sommige gevallen lopen de leveringen van nieuwe machines achter, waardoor projecten soms alsnog (deels) starten met dieselmaterieel.

Een andere barrière is, in sommige gevallen, de beperktere inzetbaarheid van ZE-materieel ten opzichte van dieselmaterieel. Veel machines hebben een kortere werktijd (soms slechts 4-6 uur), waardoor ze niet een volledige werkdag ingezet kunnen worden. In het geval van 24/7-diensten, zoals bij snelwegwerk of buitendienststellingen bij railwerken, is de uitdaging nog groter. Het laden zorgt voor extra stilstand, en bij intensief gebruik kan het energiegebruik sterk oplopen. Aannemers moeten hierdoor soms noodgedwongen terugvallen op conventionele diesel-aangedreven machines als een project anders niet uitvoerbaar blijkt.

Bij nieuwere machine-modellen speelt betrouwbaarheid ook een rol. Nieuwere machine-modellen hebben vaker last van kinderziektes, zoals softwarefouten, niet-werkende laadaansluitingen, storingen bij publiek laden of machines die de laadtoestand verkeerd weergeven (bijvoorbeeld 100%, terwijl dat niet zo is). In het geval van ZE-trucks is er een lager laadvermogen dan bij dieseltrucks vanwege het hogere leeggewicht. Hierdoor zijn er meer ritten nodig bij ZE-trucks.

8.4.2 Energievoorziening

De organisatie van de energievoorziening geldt als een van de grootste structurele uitdagingen. Het organiseren van laadinfrastructuur is vaak maatwerk en het benodigde vermogen blijkt lang niet altijd beschikbaar. Vooral wanneer er weinig aanlooptijd is, lukt het niet altijd om voldoende laadcapaciteit te organiseren. Het realiseren van een bouwaansluiting duurt vaak tussen de 9-14 maanden, met uitschieters tot meerdere jaren door netcongestie. Voor projecten korter dan zes maanden is het inrichten van een tijdelijke bouwaansluiting daarom vaak niet haalbaar.

Netcongestie belemmert opschaling; het elektriciteitsnet kan geregeld geen extra aansluitcapaciteit leveren, vooral voor vermogens boven 60 kW. Op afgelegen locaties is toegang tot het elektriciteitsnet vaker een probleem. Om deze redenen moeten aannemers improviseren met tijdelijke oplossingen, zoals batterijcontainers, hybride aggregaten of externe laadpunten.

Het gebruik van bestaande publieke laadpalen leidt soms tot problemen, omdat deze laadpunten niet ontworpen zijn voor intensief gebruik door bouwmaterieel. Bovendien kan het overlast geven voor regulier gebruik. Publieke opdrachtgevers mogen vaak geen energie leveren, waardoor zij wel kunnen faciliteren maar bijvoorbeeld geen stroom mogen doorverkopen.

Ook de batterijcontainers geven soms storingen, en vereisen extra logistiek en ruimte op de bouwplaats. Aanvullend zijn er grote verschillen in aansluitingen (CEE, CCS2, Powerlocks) en niet-gestandaardiseerde laadprotocollen (DIN en ISO). Door gebrek aan standaardisatie ontstaan compatibiliteitsproblemen alsook problemen met slim laden (uitgesteld laden werkt bijvoorbeeld niet altijd). Tot slot variëren de afstanden tot laadpunten sterk, van minder dan 50 meter tot 20 kilometer of zelfs twee uur rijden. Dit beïnvloedt de inzetbaarheid, de logistieke uitdagingen en kosten aanzienlijk. Specifiek voor Natura2000-gebieden geldt dat er vaak beperkte aanwezigheid van stroom is.

8.4.3 Projecteisen

Opdrachtgevers spelen een cruciale rol in het mogelijk maken van ZE- bouwen. Barrières ontstaan wanneer eisen te ambitieus, te weinig concreet, of juist helemaal afwezig zijn. Publieke opdrachtgevers lopen voorop, maar de verschillen in uitvragen tussen gemeenten, waterschappen en Rijksdiensten zijn groot. Private opdrachtgevers vragen ZE nog niet of nauwelijks uit.

Opdrachtnemers geven aan dat lange-termijnzekerheid (bijv. 3-5 jaar inzetgarantie) noodzakelijk is om investeringen in ZE-materieel en laadinfrastructuur rendabel te maken. Deze inzetgarantie ontbreekt vaak.

De kosten vormen een extra drempel: De inzet van ZE-materieel is vaak 2 tot 5 keer duurder, dit komt zowel uit aanschaf (mede door de kleine series) als voor de kosten van laden. Het transport van accu's en batterijcontainers, energielogistiek en netaansluitingen kunnen leiden tot fors hogere gebruikskosten. De totale kosten worden daarmee sterk bepaald door locatie, planning en de beschikbaarheid van eigen of bestaande laadinfrastructuur. Hoe meer afhankelijkheid van externe of commerciële laadpunten, hoe hoger de kosten. Deze meerkosten worden niet altijd vergoed, wat aannemers of onderaannemers afschrikt om te investeren.

Voor sommige opdrachtgevers zijn deze meerkosten lastig te verenigen met bestaande budgetkaders, waarin bijvoorbeeld slechts een klein percentage van het projectbudget mag worden ingezet voor duurzaamheidsmaatregelen.

Binnen veel opdrachtgevende organisaties is de interne afstemming nog niet optimaal. Het beleid wordt niet altijd consequent in projecten doorgevoerd en projectleiders wijken soms van ZE-afspraken af. Ook ontbreekt het vaak aan een uniforme standaard voor ZE-uitvragen, waardoor elke afdeling of projectgroep zijn eigen aanpak hanteert. Dit gebrek aan uniformiteit zorgt voor terughoudendheid bij marktpartijen.

8.4.4 Projectuitvoering

ZE-bouwen vraagt om een andere manier van werken. Het strategisch plannen van laadmomenten en het organiseren van energielogistiek (het verplaatsen van accu's of batterijcontainers) vergen veel afstemming. Bij sommige projecten leidde dit tot aangepaste pauzetijden, extra ritten naar externe laadlocaties of transport van batterijcontainers op uitdagingende locaties. Kennis over vermogensprofielen en energielogistiek is nog in ontwikkeling, terwijl deze informatie cruciaal is om laadinfrastructuur goed te plannen.

Productieverlies komt regelmatig voor, onder meer door kortere werktijd van machines, extra laadtijd (soms 30-60 minuten per laadcycclus, inclusief tijd voor reizen naar laadpunt) en omdat niet altijd het juiste machinetype beschikbaar is.

Voor tijd-kritische werkzaamheden, zoals 24/7-werkzaamheden, is het een grote uitdaging om voldoende productie te kunnen draaien. Dit leidt soms tot spanningen tussen duurzaamheidsdoelen en de druk op tijd en budget.

Versnippering in de keten speelt ook een belangrijke rol. Geregeld beschikt de hoofdaannemer maar over een klein deel van het materieel. In dat geval wordt het grootste deel geleverd door diverse onderaannemers. Dit maakt het lastiger om volledig emissieloze inzet af te dwingen.

8.4.5 Organisatie

Binnen organisaties bestaat nog beperkt kennis over de inzet en het laden van ZE-materieel, zowel bij (onder)aannemers als opdrachtgevers. Dit kan leiden tot terughoudendheid, onzekerheid over investeringen en praktische problemen in de uitvoering. Cultuur speelt hier een belangrijke rol.

Daarnaast is de kennis over ZE-techniek en laadstrategieën nog beperkt, zowel intern bij opdrachtgevers als bij ingenieursbureaus en (onder)aannemers. Dit leidt soms tot weerstand, omdat mensen onbekend zijn met de nieuwe werkwijzen of twijfelen aan de haalbaarheid ervan. Grote complexe ZE-projecten kunnen soms ook een afschrikkende werking hebben voor kleinere, meer eenvoudige projecten.

Veiligheidsaspecten vormen een aanvullende barrière. Aandacht is nodig om het wisselen van accu's op een veilige manier uit te voeren. Daarnaast valt vervoer van batterijen onder ADR-regelgeving. Ook het werken met waterstof vergt extra training, bebording en veiligheidszones. Daarnaast wordt regelmatig melding gemaakt van diefstal van kabels of problemen met kabels over de bouwplaats.

8.5 Succesfactoren

Naast barrières zijn er ook factoren die juist leiden tot een succesvolle toepassing van ZE-bouwen. Op basis van de interviews worden hieronder de belangrijkste succesfactoren beschreven, gerangschikt volgens dezelfde thema's als in het hoofdstuk over barrières.

8.5.1 Materieel

Het aanbod en de kwaliteit van ZE-materieel neemt toe, ook komen er meer OEM-machines beschikbaar. In verschillende projecten blijkt dat ZE-materieel onder de juiste condities een volledige werkdag ingezet kan worden, mede door toenemende accucapaciteiten. Materieel kan vaker een hele dag door werken doordat er voldoende accucapaciteit beschikbaar is, wisselbare accu's aanwezig zijn of wanneer een efficiënte laadstrategie wordt toegepast. Het gebruik van wisselbare accu's verhoogt de inzetbaarheid, zeker bij werk waarin continuïteit cruciaal is. Hiermee kan zelfs 24 uur per dag gewerkt worden.

De onderhoudskosten blijken vaak lager en het materieel toont een hoge mate van betrouwbaarheid, zeker wanneer storingen zijn opgelost na de eerste inregelperiode. Ook worden voordelen genoemd zoals minder geluidsproductie, wat communicatie op de bouwplaats verbetert en het werk veiliger en aangenamer maakt voor machinisten.

Sommige organisaties werken met een materieellijst of een andere vorm van databank waarin beschikbaar materieel en bijbehorende kosten worden bijgehouden.

Dit helpt bij projectvoorbereiding en aanbestedingen, alsook bij kennisdeling tussen opdrachtgever en aannemer. Door deze transparantie groeit het vertrouwen dat ZE-materieel op steeds meer projecten inzetbaar is.

8.5.2 Energievoorziening

Organisatie van laadinfrastructuur

Een belangrijke succesfactor is het tijdig regelen van laadmogelijkheden in de voorbereidingsfase. Het helpt aanzienlijk wanneer projecten gebruik kunnen maken van een bestaande aansluiting die eenvoudig kan worden uitgebreid, of wanneer grote projecten voldoende doorlooptijd hebben om een nieuwe aansluiting te organiseren.

Op het gebied van energievoorziening blijkt een proactieve en faciliterende rol van de opdrachtgever regelmatig nuttig. Opdrachtgevers die vroegtijdig energiescans organiseren (via externe bureaus of interne projectteams) krijgen sneller inzicht in waar stroom beschikbaar is en welke aanvullende maatregelen nodig zijn. Het beschikbaar stellen van deze informatie in de aanbesteding geeft aannemers een vliegende start en voorkomt verrassingen tijdens de uitvoering. Via energiescans worden bovendien nieuwe laadlocaties ontdekt, zoals bij scholen, sportverenigingen, sluizen en gemalen. Sommige opdrachtgevers richten zelfs specifieke laadpleinen in, variërend van stedelijke hubs tot laadpleinen met 15 aansluitingen of meer. Aanvullend kunnen opdrachtgevers middels de bouwlaadpas toegang regelen tot openbare laadpalen. Indien de aannemer voldoende tijd heeft om het zelf te organiseren, is de faciliterende rol van de opdrachtgever beperkter of niet nodig.

Projecten met een vaste beslisstrategie (zoals: “eerst bouwaansluiting, dan extern laden, dan accutransport, dan batterijcontainers”) hebben een voordeel. Samenwerking met opdrachtgevers en netpartijen maakt het mogelijk om sneller en gericht keuzes te maken. Daarnaast blijkt dat creativiteit werkt, zoals het benutten van overcapaciteit in de buurt en het gebruik van wisselbare accu's.

Alternatieve laadopties en flexibele contractvormen

Naast vaste (bouw)energie-infrastructuur worden ook alternatieve laadopties succesvol ingezet.

Dit omvat onder meer:

- Laden bij externe partijen (zoals bedrijven, wijkcentra, publieke laadpalen);
- Gebruik van bestaande contracten van publieke opdrachtgever (zoals evenementenstroom en marktstroom);
- Externe energiehubs en laadpleinen;
- Hybride oplossingen, zoals accu's gekoppeld aan zonnepanelen of biogasaggregaten;
- Energy-as-a-service modellen, waarbij accu's en laadcapaciteit worden geleverd tegen vaste tarieven;
- Wisselaccu-concepten, vooral voor machines met stevige inzet;
- Laadopties via bovenleiding bij railprojecten;

Waterschappen en gemeenten werken bovendien met netbeheerders aan flexibele contractvormen (zoals tijdgebonden contracten), of verhogen bestaande aansluitcontracten, zodat ze ook door aannemers gebruikt kunnen worden. Dit helpt wanneer er vanwege netcongestie geen nieuwe aansluitingen georganiseerd kunnen worden en maakt het geheel betaalbaarder.

Monitoring & inzicht

Een terugkerende succesfactor is goed inzicht in energiegebruik. Projecten die actief monitoren kunnen de juiste aansluiting aanvragen. Dit maakt het mogelijk om overdimensionering van aansluitingen te voorkomen, wat tijd en kosten bespaart. Daarnaast kan de laadstrategie- en planning verbeterd worden, bijvoorbeeld om piekbelasting te voorkomen. Voor kleinere standaardprojecten zijn de complexiteit en kosten vaak relatief laag en kan de energievraag ook relatief eenvoudig worden ingeschat.

8.5.3 Projecteisen

Een belangrijke succesfactor is een uniforme set aan duidelijke en realistische ZE-uitvraag in aanbestedingen.

Hierbij helpen:

- Lange-termijn inzetgaranties, mogelijke middels innovatiepartnerschappen of SOK-constructies;
- Realistische ZE-eisen met dekking van (deel)meerkosten;
- Fictieve kortingen of hogere gunningsscores voor ZE-inzet;
- Gelijk speelveld door duidelijke eisen en marktconsultaties;
- Stikstofeisen, waardoor ZE nodig kan zijn om het vergunningsproces te versnellen.

Wanneer opdrachtgevers hun rol actief oppakken, bijvoorbeeld door mee te helpen in het faciliteren van laadinfra en meerkosten te dekken, ontstaat ruimte voor aannemers om te investeren. Samenwerking en open dialoog worden door vrijwel alle partijen genoemd als cruciale succesfactor.

Subsidies zoals SSEB, SPUK SEB (Regeling stimulering Schoon en Emissieloos Bouwen voor medeoverheden), SEB aanbestedende Rijksdiensten, helpen opdrachtgevers en aannemers om de meerkosten van ZE-bouwen (deels) op te vangen. Sommige organisaties stellen intern extra middelen beschikbaar, of verlengen contractduren naar 6-8 jaar waardoor investeringen in ZE-materieel kunnen worden terugverdiend.

8.5.4 Projectuitvoering

Planning, laadstrategie & energielogistiek

Een succesvolle uitvoering van ZE-projecten vraagt om aangepaste werkmethoden om productieverlies te beperken of te vermijden.

Voorbeelden zijn:

- Strategisch plaatsen van laadpunten (liefst zo dichtbij als mogelijk bij de bouwplaats);
- Slim plannen van laadmomenten (bijv. tijdens pauzes, of juist in nacht, uitgesteld laden);
- Het voorkomen van piekvermogens;
- Het inzetten van accuboxen die 's nachts worden opgeladen op een hub;
- Het spreiden van werkzaamheden om piekbelasting te vermijden;
- Gebruik van stroom uit de directe omgeving.

Omgeving, duurzaamheid & gezondheid

De uitvoering van ZE-projecten zorgen voor een duidelijke meerwaarde voor omgeving en personeel:

- Minder geluid en trillingen;
- Geen stankoverlast;
- Verbeterde luchtkwaliteit;
- Fijnere werkomgeving voor machinisten.

Deze voordelen dragen bij aan draagvlak binnen het project én daarbuiten.

8.5.5 Organisatie

Contract, communicatie & kennis

Succesvolle uitgevoerde ZE-projecten delen een aantal organisatorische kenmerken:

- Duidelijke samenwerkingsovereenkomsten of innovatiepartnerschappen;
- Transparante communicatie tussen opdrachtgever en opdrachtnemer;
- Tijdige afstemming over laadinfra, locatiekeuzes en planning;
- Regelmatige voortgangsgesprekken en rapportages;
- Kennisborging binnen bedrijven, bijvoorbeeld via technische diensten of energiecoördinatoren;
- Kennisdeling in de sector;
- Goede afstemming tussen beleids- en projectorganisatie.

Hulpmiddelen, zoals stroomkaart.nl, vergroten inzicht in beschikbare aansluitingen en kosten. Klein beginnen, zoals leren van kleinere projecten, helpt om ervaring op te bouwen.

Cultuur & onderaannemers

Projecten waarin onderaannemers worden meegenomen in de transitie, bijvoorbeeld via instructies, samenwerkingsafspraken of toegang tot ZE-materieel, hebben grotere kans op een succesvolle uitvoering. Ondersteuning, training en positieve ervaringen helpen de cultuurverandering op gang binnen en buiten de organisatie.

Enthousiasme, creativiteit en de bereidheid om obstakels weg te werken vormen vaak het verschil tussen “niet kunnen” en “gewoon doen”. Aannemers en opdrachtgevers die pragmatisch handelen, klein beginnen en successen uitbouwen, komen sneller vooruit. Het betrekken van machinisten en uitvoerend personeel zorgt bovendien voor draagvlak, vertrouwen en een soepelere invoering op de bouwplaats. Positief management draagt sterk bij aan deze overgang.

8.6 Combinatie van barrières en succesfactoren

De interviews laten zien dat ZE-bouwen nog veel barrières kent, maar dat succesvolle projecten aantonen dat deze obstakels goed te overwinnen zijn wanneer technische, organisatorische en contractuele succesfactoren worden ingezet. Meerdere knelpunten blijken niet per sé een technische onmogelijkheid, maar een kwestie van voorbereiding, samenwerking en slimme organisatie.

8.6.1 Materieel

De inzet van ZE-materieel wordt zowel gekenmerkt door duidelijke barrières als door belangrijke succesfactoren. De flexibiliteit is momenteel lager dan bij dieselmaterieel, doordat machines afhankelijk zijn van laadinfrastructuur en minder eenvoudig tussen projecten kunnen worden verplaatst. Het aanbod is nog beperkt (met veel ombouw en weinig OEM), waardoor niet altijd het juiste type of formaat beschikbaar is en soms concessies nodig zijn in de inzet. Daarnaast kennen veel ZE-machines een kortere inzetduur per dag, wat vooral bij intensief of 24/7-werk tot stilstand en productieverlies kan leiden.

Bij nieuwere modellen spelen soms kinderziektes, zoals laad- en softwareproblemen, en bij ZE-trucks zorgt het hogere gewicht voor een lager laadvermogen.

Tegelijkertijd blijkt dat deze barrières onder de juiste randvoorwaarden grotendeels te overwinnen zijn. Met voldoende accucapaciteit (die laatste jaren toeneemt), wisselbare accu's en een efficiënte laadstrategie kan ZE-materieel een volledige werkdag, en in sommige gevallen zelfs continu, worden ingezet. Na een initiële inregelperiode is de betrouwbaarheid vaak hoog en zijn de onderhoudskosten lager. Ook neemt het aanbod van machines toe, waaronder OEM-machines. Het werken met materieellijsten met bijbehorende kosten maakt projectvoorbereiding makkelijker en zorgt voor transparantie tussen opdrachtgever en opdrachtnemer. Bovendien zorgen stillere machines voor een veiligere, prettigere en efficiëntere werkomgeving op de bouwplaats.

8.6.2 Energievoorziening

De energievoorziening vormt één van de grootste uitdagingen bij ZE-bouwen. Lange doorlooptijden voor bouwaansluitingen, vaak versterkt door netcongestie, maken het voor projecten (vooral kortlopende projecten) moeilijk om tijdig over voldoende energie te beschikken. Met name bij vermogens boven 60 kW en op afgelegen locaties (geldt ook voor N2000 gebieden) is extra capaciteit vaak niet beschikbaar. Hierdoor zijn aannemers aangewezen op tijdelijke en alternatieve oplossingen, zoals batterijcontainers en externe laadpunten. Deze oplossingen vergroten de logistieke complexiteit, vragen extra ruimte op de bouwplaats en kennen soms storingen. Het gebrek aan standaardisatie in laadsystemen en -protocollen en grote afstanden tot laadpunten beperken daarnaast de inzetbaarheid van ZE-materieel alsook mogelijkheden voor slim laden (zoals uitgesteld laden).

Tegelijkertijd laten succesvolle projecten zien dat deze knelpunten beheersbaar zijn met een goede voorbereiding, flexibiliteit en een mix van oplossingen. Het tijdig organiseren van laadinfra, het benutten van bestaande of uitbreidbare aansluitingen bij nabijgelegen bedrijven en het hanteren van een duidelijke beslisstrategie omtrent de laadopties vergroten de mogelijkheden. Creatieve combinaties van externe laadlocaties, energiehub's, wisselaccu's en batterijcontainers bieden extra flexibiliteit. Opdrachtgevers die vroegtijdig energiescans uitvoeren en deze informatie meenemen in de aanbesteding, creëren duidelijkheid over beschikbare stroom en eventueel benodigde maatregelen, waardoor aannemers direct effectief kunnen starten. Door actief laadlocaties te identificeren, laadpleinen te faciliteren en toegang tot openbare laadpalen te regelen, vervullen opdrachtgevers een nuttige en faciliterende rol in het soepel organiseren van de energievoorziening voor ZE-projecten. Daarnaast proberen publieke opdrachtgevers bestaande aansluitingen breder inzetbaar te maken en werken met netbeheerders aan flexibele, tijdgebonden contracten, waardoor, ondanks netcongestie, toch stroom beschikbaar komt.

Tot slot zorgt actief monitoren van energiegebruik voor beter inzicht rondom de juiste aansluiting, efficiëntere laadstrategieën zonder piekbelasting en het voorkomen van onnodige kosten door overdimensionering.

8.6.3 Projecteisen

Opdrachtgevers vervullen een belangrijke rol in het mogelijk maken van ZE-bouwen. Barrières ontstaan wanneer ZE-eisen ontbreken, onvoldoende concreet zijn of juist te ambitieus worden geformuleerd. Hoewel publieke opdrachtgevers vooroplopen, verschillen de uitvragen sterk tussen overheden, terwijl private opdrachtgevers ZE nog nauwelijks meenemen.

Dit gebrek aan eenduidigheid en voorspelbaarheid bemoeilijkt investeringsbeslissingen. Daarnaast ontbreekt vaak langetermijnzekerheid, zoals inzetgaranties van 3-5 jaar, die nodig zijn om de hoge aanschaf- en gebruikskosten van ZE-materieel en laadinfrastructuur terug te verdienen. Ook worden meerkosten, inclusief energielogistiek, accu- en containertransport en netaansluitingen, niet altijd vergoed, wat investeren risicovoller maakt voor aannemers. Voor sommige opdrachtgevers zijn deze meerkosten lastig te verenigen met bestaande budgetkaders. Daarnaast is binnen veel opdrachtgevende organisaties de interne afstemming tussen de beleidsorganisatie en uitvoerende organisatie nog niet optimaal en ontbreekt het aan uniformiteit in de uitvragen.

Deze barrières kunnen worden verkleind door een duidelijke, realistische ZE-uitvraag. Aanvullend stimuleren inzetgaranties, dekking van (een deel van) de meerkosten en instrumenten, zoals fictieve kortingen, de benodigde investeringen. Voor een dekking van de meerkosten zijn ook meerdere subsidies mogelijk (zoals SSEB en SPUK SEB). Aanvullend verlengen sommige opdrachtgevers de contractduren naar 6-8 jaar om voldoende tijd te bieden voor het terugverdienen van de investeringen. Wanneer opdrachtgevers actief meewerken en gezamenlijk verantwoordelijkheid zijn, bijvoorbeeld door laadinfrastructuur te faciliteren en in open dialoog samen te werken met transparante communicatie, ontstaat ruimte voor versnelling van ZE-bouwen en vermindering van onzekerheid. Door stikstofeisen kan ZE-nodig zijn om tijdig een vergunning te krijgen

8.6.4 Projectuitvoering

De uitvoering van ZE-projecten vraagt om een andere manier van werken, waarbij planning en energielogistiek een centrale rol spelen. Het plannen van laadmomenten en het organiseren van accutransport of batterijcontainers vergt extra afstemming en kan leiden tot aangepaste pauzetijden, extra ritten naar externe laadlocaties en logistieke uitdagingen op complexe of krappe bouwplaatsen. Hierdoor treedt regelmatig productieverlies op, onder meer door kortere inzetduur van machines, extra laadtijd en het ontbreken van het juiste machinetype. Vooral bij tijd kritische of 24/7-werkzaamheden vormt dit een grote uitdaging. Ook de versnippering van werk speelt vaak een rol, waarbij verschillende onderaannemers het merendeel van het materieel beheren.

Productieverlies kan grotendeels worden beperkt door aangepaste werkmethoden. Strategisch geplaatste laadpunten dicht bij de bouwplaats, slim geplande laadmomenten (bijvoorbeeld tijdens pauzes of 's nachts) die piekvermogens verminderen, het gebruik van accuboxen die extern worden opgeladen, het gebruik van stroom uit de directe omgeving, en het spreiden van werkzaamheden om piekbelasting te voorkomen, dragen bij aan een robuuste uitvoering. Daarnaast levert ZE-bouwen duidelijke voordelen op voor omgeving en personeel, zoals minder geluid, geen uitstoot en een prettigere werkomgeving, wat het draagvlak en de acceptatie van ZE-projecten vergroot.

8.6.5 Organisatie

Binnen veel organisaties is de kennis over de inzet, het laden en de consequenties van ZE-materieel nog beperkt. Dit leidt tot terughoudendheid en/of weerstand bij opdrachtgevers en (onder)aannemers vanwege vraagtekens over de haalbaarheid. Daarnaast leidt dit tot onzekerheid over investeringen en praktische knelpunten in de uitvoering. Ook cultuur speelt hierbij een belangrijke rol: werken met ZE vraagt om andere routines en verantwoordelijkheden. Grote complexe ZE-projecten kunnen daarbij soms ook een afschrikkende werking hebben voor kleinere meer eenvoudige projecten.

Veiligheid vormt een aanvullende barrière, met name bij het wisselen en vervoeren van accu's (ADR-regelgeving) en bij toepassingen met waterstof, die extra training, procedures en veiligheidszones vereisen. Daarnaast komen praktische problemen voor, zoals diefstal van kabels en hinder van kabels op de bouwplaats.

Succesvolle ZE-projecten laten zien dat deze barrières te verkleinen zijn met een sterke organisatorische aanpak. Hiervoor is een goede afstemming nodig tussen de beleids- en projectorganisatie bij opdrachtgevers. Duidelijke samenwerkingsafspraken, transparante communicatie en tijdige afstemming over laadinfrastructuur en planning zijn cruciaal. Regelmatige voortgangsgesprekken en interne kennisopbouw en -borging zijn hiervoor van belang. Ook onderaannemers komen beter mee wanneer zij vroeg worden betrokken. Het is nuttig om klein te beginnen en daarmee ervaring op te bouwen. Tot slot blijken gedragsverandering, creativiteit, pragmatisch handelen, training en enthousiast leiderschap essentieel om ZE-werken structureel te verankeren in de organisatie.

In de onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven van de barrières en succesfactoren per categorie.

Tabel 8.2: Overzicht van barrières en succesfactoren per categorie.

Categorie	Barrières	Succesfactoren
1. Materieel - inzet, flexibiliteit & betrouwbaarheid	- Kortere werktijd dan diesel, niet 24/7 inzetbaar - Minder varianten beschikbaar, soms verkeerde machinegrootte - Lange levertijden, beperkte beschikbaarheid, hoge aanschafkosten - Schaalgrootte ontbreekt door gebrek aan OEM-machines - Beperkte flexibiliteit door afhankelijkheid laadinfra - Kinderziekten bij nieuwe modellen: softwarefouten, laadproblemen, storingen - Lagere laadcapaciteit trucks → meer ritten nodig	- Aanbod materieel neemt toe, waaronder OEM-materieel - Volledige werkdag inzetbaar bij juiste accustrategie - Wisselaccu's vergroten inzetbaarheid, en maken- 24/7-inzet mogelijk - Accucapaciteiten nemen toe - Lagere onderhoudskosten materieel - Overzichten van aanbod materieel en kosten door materieellijsten
2. Energievoorziening - laadinfrastructuur	- Doorlooptijd bouwaansluiting 6-14 maanden (uitlopers >1 jaar) - Vaak niet haalbaar voor korte projecten - Standaardisatie niet altijd op orde - Slim laden geeft soms storingen door beperkte standaardisatie - Soms afhankelijkheid van publieke laders	- Vroegtijdig organiseren van laadinfra - Bestaande aansluitingen uitbreiden werkt snel en efficiënt - Lange projectduur maakt investeringen rendabel - Creatieve oplossingen benutten: stroom van burens, wijkcentrums, fabrieken - Energiescans creëren duidelijkheid over beschikbare stroom - Organisatie van laadpleinen, al dan niet door opdrachtgever
3. Energievoorziening - netcongestie & capaciteit	- Structurele netcongestie belemmert aansluitingen - Laadvermogens >60 kW regelmatig niet beschikbaar - Kostbaar en traag aansluitproces - Afgelegen locaties zonder netcapaciteit (geldt vaak voor N2000)	- Slim combineren van laadopties (accu's, extern laden) - Modellen waarbij energie op de bouwplaats wordt geleverd met accu's - Gebruik van batterijcontainers om aansluitwaarde laag te houden - Laden bij externe hubs of private partijen

4. Energievoorziening - alternatieve laadopties	- Onvoldoende lokale laadcapaciteit - Accu's gevoelig voor slijtage, modder, scheefstand bij wisselen	- Laden via rail-bovenleiding - Stroom via omgeving - Accuboxen laden dichtbij het werk - Netwerk van regionale laadpleinen - Waterstof als aanvullende energiedrager - Beslisboom voor laadopties (bouwaansluiting → extern laden → accutransport → batterijcontainer) - Flexibele contractvormen of ophoging bestaande contracten via opdrachtgever
5. Energievoorziening - monitoring & inzicht	- Energiebehoefte vaak onvoldoende bekend - Onzekerheid over werkelijke laad- en verbruiksprofielen	- Energiegebruik actief monitoren (dashboards) - Inzicht voorkomt overdimensionering - Beter plannen van laadmomenten & capaciteit - Voor kleinere standaardprojecten is inschatting energievraag relatief eenvoudig
6. Projecteisen - aanbestedingsproces	- Onvoldoende duidelijke en niet uniforme ZE-uitvraag - Te ambitieuze eisen zonder dekking meerkosten - Meerkosten laadinfra sterk locatie-afhankelijk - Geen inzetgaranties, te weinig zekerheid - Sub-optimale afstemming tussen project- en beleidsorganisatie - Private opdrachtgevers vragen ZE nauwelijks uit	- Duidelijke ZE-uitvragen met voordeel voor ZE - Innovatiepartnerschappen & SOK-constructies - Fictieve korting bij duurzame inzet - Inzetgaranties (meerdere jaren) maken investeringen mogelijk - Gebruik van subsidies voor dekking van deel meerkosten
7. Projecteisen - rol opdrachtgever	- Onvoldoende faciliteren van laadinfra - Te weinig samenwerking in voorbereiding	- Opdrachtgever faciliteert/ondersteunt laadvoorzieningen, bijvoorbeeld middels energiescans - Vroegtijdig meedenken over laadlocaties en vergunningen - Gedeelde verantwoordelijkheid in organiseren laadinfra - Nauwe samenwerking versnelt realisatie
8. Projecteisen - Vergunningen & stikstof	- Beperkende vergunningstrajecten, stikstofregels kunnen ZE afdwingen	- N2000-gebieden en benodigde stikstofreductie stimuleren ZE-inzet - ZE voorkomt vertraging en kosten door stikstofuitstoot
9. Projectuitvoering - planning & energielogistiek	- Laden vergt extra tijd (tot 60 min incl. verplaatsen) - Acculogistiek (containers/accu's) is complex - Te weinig fysieke ruimte op kleine locaties voor batterijcontainer - Productieverlies bij onvoldoende laadcapaciteit - Versnippering materieel tussen hoofd- en onderaannemers	- Slim laden, bijv. tijdens pauze en nachtelijke laadplanning - Strategisch geplaatste laadpunten dichtbij bouwplaats - Accuboxen die 's nachts worden opgeladen op hubs/laadpleinen - Werkmethoden worden efficiënter door nieuwe planningstechnieken - Vermijden van piekvermogens
10. Projectuitvoering - omgeving & gezondheid		- Stil, emissievrij, geen stank → betere werk- en leefomgeving - Beter voor gezondheid en omgeving - Machinisten ervaren minder stress door stille machines
11. Organisatie - contract & samenwerking	- Geen eenduidige kostenverdeling - Gebrek aan afspraken met onderaannemers	- Samenwerkingsovereenkomsten & innovatiepartnerschappen - Afspraken over inzetgaranties - Goede afstemming tussen beleids- en projectorganisatie
12. Organisatie - communicatie	- Onvoldoende afstemming over haalbaarheid en planning	- Transparante dialoog, tussentijdse evaluaties - Gezamenlijk oplossen van knelpunten werkt motiverend - Regelmatige rapportages & monitoring
13. Organisatie - kennis & cultuur	- Onbekendheid met ZE-techniek en laadstrategieën - Sceptis en weerstand binnen de organisatie - Onderaannemers nog niet mee	- Interne kennisopbouw (technische dienst, energiemanager) - Personeel goed instrueren over laadgedrag - Positieve houding en betrokken management - Gedragsverandering richting bewust energiegebruik

8.7 Conclusies en aanbevelingen

Vanuit de interviews met opdrachtnemers zijn de onderstaande conclusies en aanbevelingen geformuleerd.

Conclusies:

1. ZE-bouwen is technisch haalbaar, maar organisatorisch complex: De meeste barrières zijn geen technische onmogelijkheid, maar ontstaan door onvoldoende voorbereidingstijd voor energie-inrichting en zowel interne als externe samenwerking en afstemming. Met de juiste randvoorwaarden zijn veel van de barrières beheersbaar.
2. Materieel functioneert goed onder de juiste randvoorwaarden, met voordelen voor werkomgeving: Beperkingen in inzetbaarheid, flexibiliteit en aanbod (veel ombouw, weinig OEM) bestaan, maar kunnen grotendeels worden ondervangen met voldoende accucapaciteit (welke toeneemt), wisselaccu's en een doordachte laadstrategie. Na de opstartfase is ZE-materieel betrouwbaar en kan kostenefficiënt zijn. Er zijn lagere onderhoudskosten en duidelijke voordelen voor werkomgeving, hinder en gezondheid.
3. Energievoorziening is het grootste structurele knelpunt: Lange doorlooptijden, netcongestie en gebrek aan standaardisatie beperken opschaling, vooral bij kortlopende en afgelegen projecten. De uitvoerbaarheid wordt vergroot door het laten uitvoeren energiescans, het benutten van bestaande aansluitingen in de omgeving, laadpleinen en een mix van laadopties.
4. Gebrek aan standaardisatie leidt tot beperkingen: Gebrek aan standaardisatie in laadsystemen, stekkers en communicatieprotocollen vergroot de kans op compatibiliteitsproblemen en storingen. Dit leidt tot beperkingen in de inzetbaarheid en mogelijkheden van slim laden.
5. Gebrek aan inzicht in energiegebruik vergroot risico's en kosten: Onvoldoende kennis van werkelijke energiebehoefte tijdens het project leidt tot onzekerheid, potentiële overdimensionering van de benodigde laadvoorziening en inefficiënte laadstrategieën. Projecten met actieve monitoring kunnen beter sturen op laadcapaciteit, kosten en planning.
6. De rol van opdrachtgevers is sterk bepalend voor investeringsbereidheid: Onduidelijke, inconsistente of te ambitieuze ZE-eisen, zonder inzetgaranties of kostenvergoeding, vertragen investeringen. Waar opdrachtgevers duidelijke uitvragen combineren met inzetgaranties, dekking van (deel) meerkosten, en samenwerking rondom faciliteren van laadinfra, ontstaan meer mogelijkheden.
7. Projectuitvoering voor ZE bouwen vraagt om een aangepaste werkwijze: Zonder aangepaste planning en energielogistiek kan productieverlies ontstaan, dit is deels te beheersen door een robuuste (laad)planning, strategische geplaatste laadpunten en waar mogelijke een spreiding van intensieve werkzaamheden.
8. Kennis, cultuur en samenwerking bepalen succes: Gebrek aan kennis rondom ZE (zowel bij (onder)aannemers als opdrachtgever, ervaring en routine zorgen voor terughoudendheid. Betrokken en geïnformeerde teams en duidelijke

samenwerkingsafspraken leiden tot meer succesvolle projecten. Enthousiasme, creativiteit en een pragmatische aanpak zijn hierbij ook van belang.

9. Vergunningen en stikstof werken als versneller: In stikstofgevoelige gebieden voorkomt ZE-bouwen vertragingen en extra kosten, waardoor ZE niet alleen duurzaam maar ook strategisch aantrekkelijk wordt.

Aanbevelingen:

1. Verhoog inzetbaarheid ZE-materieel: Bepaal vooraf goed welke accucapaciteit nodig is, al dan niet via wisselbare accu's. Gebruik materieellijsten als overzicht voor beschikbare machines en bijbehorende kosten.
2. Organiseer energievoorziening als kernonderdeel van projectvoorbereiding: Regel laadinfrastructuur vroegtijdig in het proces. Een energiescan door de opdrachtgever voorafgaand aan de aanbesteding kan daarbij helpen. Benut bestaande aansluitingen in de omgeving zo goed als mogelijk, al dan niet via flexibele contracten met stroomleveranciers (zoals tijdgebonden contracten). Werk met vaste beslisstrategieën en combineer waar nodig meerdere laadoplossingen (zoals: bouwaansluiting → extern laden → accutransport → batterijcontainers).
3. Maak energiegebruik inzichtelijk en acteer naar verworven inzichten: Begin vroeg met energiemonitoring, al dan niet met behulp van dashboards. Gebruik data om aansluitwaarden, laadmomenten en logistiek te optimaliseren. Voorkom overdimensionering en piekbelasting.
4. Versnel standaardisatie van laadinfrastructuur en ZE-materieel om extra kosten te verminderen: Werk binnen de sector aan uniforme laadstandaarden en modulaire oplossingen. Stimuleer leveranciers om materieel en laadoplossingen te ontwikkelen die breed compatibel zijn. Dit vergroot flexibiliteit en verlaagd kosten.
5. Formuleer als opdrachtgever duidelijke en realistische ZE-uitvragen die investeringen mogelijk maken: Zorg voor eenduidige eisen, vergoed waar passend (een deel van) de meerkosten en bied zekerheid en voordelen via meerjarige inzetgaranties en/of fictieve kortingen / gunningsvoordelen.
6. Help als opdrachtgever - waar nodig - met faciliteren van laadinfrastructuur: Help bij het organiseren van laadinfrastructuur, eventuele vergunningen en locatiekeuzes. Neem gedeelde verantwoordelijkheid voor energievoorziening. Werk in open dialoog samen met opdrachtnemers en netbeheerders. Energiescans, bouwlaadpassen en laadpleinen kunnen hierbij helpen. Indien de aannemer voldoende tijd heeft om het zelf te organiseren, is de faciliterende rol van de opdrachtgever beperkter of niet nodig.
7. Pas projecten aan op ZE-werken: Pas planning, fasering en werkmethoden aan op benodigde laadplanning en energielogistiek om productieverlies te beperken. Denk hierbij ook strategische aan plaatsing van de laadpunten (dicht bij de bouwplaats).
8. Investeer in organisatie, kennis en cultuur: Investeer in training rondom ZE-werken en laadgedrag, interne kennisborging (bijvoorbeeld via technische diensten en/of energiemangers), en vroege betrokkenheid van onderaannemers. Deel hierbij de best practices breed en stimuleer samenwerking met onderaannemers. Begin klein en schaal daarna op.

9. Benut de maatschappelijke meerwaarde van ZE-bouwen: Zet voordelen, zoals minder geluid, betere luchtkwaliteit, minder stikstof en prettigere werkomstandigheden actief in om draagvlak te vergroten.

9 Discussie

De transitie naar emissieloze bouwplaatsen toont in de praktijk een duidelijke spanning tussen beleidsambities en de operationele werkelijkheid. Uit de onderzochte cases binnen TRANSENERGY blijkt dat zero-emissie (ZE) bouwen technisch haalbaar is, maar dat de uitvoerbaarheid sterk afhankelijk is van de mate waarin energievoorziening, vermogensvraag en laadlogistiek tijdig en expliciet worden georganiseerd. Dit vraagt om een betere borging van randvoorwaarden in de vroege projectfase. Een belangrijke rol ligt zowel bij opdrachtgevers die regie nemen op randvoorwaarden en bij aannemers die optimaliseren op basis van betrouwbare data.

Kloof tussen ambities en praktijk

Hoewel overheden via (SEB)-routekaarten, aanbestedingscriteria en samenwerkingsovereenkomsten (zoals de SOK 2.0 in Amsterdam) sturen op emissieloos materieel, laat deze case zien dat het niet altijd lukt om deze afspraken te realiseren. De oorzaak ligt niet in een tekortschietende technische capaciteit, maar in onvoldoende voorbereiding: vermogensbehoefte, aansluitingen en laadinfrastructuur worden niet vroeg genoeg vastgelegd. Hierdoor ontstaat in de uitvoering tijdsdruk of budgetdruk en wordt alsnog conventioneel materieel ingezet. Ook uit interviews blijkt dat de grootste knelpunten niet technisch zijn, maar organisatorisch: onvoldoende standaardisatie, gebrek aan informatie over werkelijke energievraag en onduidelijke of inconsistente uitvragen door opdrachtgevers.

Om de kloof te verkleinen, is een structurele verankering nodig van energievoorziening in het projectvoorbereidingsproces. Even belangrijk is het bieden van zekerheid en proportionaliteit in de aanbesteding: wanneer opdrachtgevers duidelijke, realistische eisen stellen en (een deel van) meerkosten vergoeden, ontstaat bij marktpartijen de bereidheid om in ZE-materieel en laadlogistiek te investeren.

Regie en rolverdeling: opdrachtgever versus aannemer

Een terugkerend patroon is dat de opdrachtgever een beslissende rol speelt in het mogelijk maken van emissieloos bouwen. In de case Harderwijk bleek vroege facilitering van laadinfrastructuur door de gemeente, via een laadhub met drie laadcontainers, een directe succesfactor voor volledige ZE-uitvoering op de bouwplaats. De aannemer kon hierdoor materieel inzetten zonder afhankelijk te zijn van late netaansluitingen of ad-hoc oplossingen.

In de ProRail-case werd duidelijk dat energievoorziening via een spooronderstation alleen werkt wanneer de opdrachtgever vooraf heldere kaders en contractvormen neerzet, zoals afspraken over tarieven. Daarnaast blijkt de effectiviteit van laadinfrastructuur sterk afhankelijk van logistieke randvoorwaarden, zoals de afstand tussen laadpunt en bouwplaats (ideaal ≤ 500 m).

Deze cases illustreren dat de traditionele rolverdeling - opdrachtgever formuleert eisen, aannemer organiseert uitvoering - niet altijd meer voldoende is. De energievoorziening is een kritieke randvoorwaarde waarbij opdrachtgevers een faciliterende rol kunnen spelen. De aannemer blijft verantwoordelijk voor optimalisatie van materieelkeuze, inzetplanning en laadstrategie, maar kan dit alleen effectief doen wanneer de basisinfrastructuur en randvoorwaarden vooraf zijn geborgd. Indien de aannemer voldoende tijd heeft om het zelf te organiseren, is de faciliterende rol van de opdrachtgever beperkter of niet nodig.

Vroegtijdige borging van randvoorwaarden

In vrijwel alle cases blijkt dat tijdige explicitering van vermogensvraag en laadbehoefte essentieel is. De energievraag van ZE-materieel kent pieken, is locatie-afhankelijk en verschilt aanzienlijk per projecttype. De cross-case analyse toont bijvoorbeeld het verschil tussen lichte GWW-projecten (met relatief lage en stabiele vermogensbehoefte) en zware buitenstedelijke GWW-projecten, zoals asfalt, rail of kustverdediging, waar vermogensvragen kunnen oplopen tot 1-10 MWh/dag.

Met vroegtijdige borging kan onder andere bedoeld worden:

- het uitvoeren van energiescans voorafgaand aan de aanbestedingsfase;
- dimensionering van aansluitwaarde en benodigde laadpunten;
- scenario's voor buffering, laadpunten of wisselaccu's;
- en een realistische doorlooptijd voor aanvragen van netaansluitingen.

Inzichten uit metingen en data-analyses voor opschaling

De operationele data uit de cases bieden waardevolle inzichten voor opschaling van ZE-bouwplaatsen. Zo blijkt dat de accucapaciteiten van de verschillende machines over het algemeen goed aansluiten bij de inzetprofielen, maar dat de benuttingsgraden sterk variëren tussen machineklassen. Sommige machines worden structureel stevig belast, terwijl andere relatief lichte belasting tonen. Deze variatie biedt mogelijkheden om toekomstige projecten beter te dimensioneren wat betreft accugrootte, laadsnelheid en inzetplanning. Verder tonen de analyses dat wisselaccu-systemen technisch betrouwbaar functioneren, maar dat laadstrategieën vaak conservatief zijn, waardoor accupotentieel niet optimaal wordt benut. Voor ZE-trucks blijkt het energiegebruik vooral afhankelijk van inzetprofiel, rijomgeving, rijstijl en seizoensinvloeden (met name verwarming).

Bij voldoende data kunnen de inzichten vertaald worden naar standaard laadarchitecturen per projecttype en naar verbeterde laadstrategieën

Minimale eisen voor goede monitoringsdata

Zowel de cases van Harderwijk als ProRail bevestigen dat goede datakwaliteit een randvoorwaarde is voor optimalisatie. In Harderwijk ontbrak een betrouwbare koppeling tussen inzetdata en laaddata, waardoor afwijkingen ontstonden tussen geschat en geladen energie. In ProRail bleek dat laadtags niet gekoppeld waren aan specifieke machines, waardoor energiestromen niet herleidbaar waren.

10 Conclusie en aanbevelingen

ZE-bouwplaatsen zijn technisch haalbaar, maar de grootste uitdagingen liggen momenteel in organisatie, voorbereiding en tijdige energiebeschikbaarheid; niet in het materieel zelf. Voor de realisatie van ZE-bouwplaatsen zijn de volgende aandachtspunten bepalend (zie Tabel 10.1):

- Sleutelrol voor de opdrachtgever in de organisatie van randvoorwaarden
- Succes valt of staat met vroegtijdige energieplanning
- Verbeterde monitoring en standaardisatie nodig voor opschaling
- Nieuwe werkmethoden en kennisontwikkeling noodzakelijk als voorwaarde voor implementatie.

Tabel 10.1 Bepalende aandachtspunten voor de realisatie van ZE-bouwplaatsen

Sleutelrol voor opdrachtgever in organisatie van randvoorwaarden	Succes valt of staat met vroegtijdige energieplanning	Verbeter monitoring & standaardisatie nodig voor opschaling:	Nieuwe werkmethoden en kennisontwikkeling noodzakelijk
➤ Maak ZE-uitvragen voorspelbaar en realistisch: Bied zekerheid via meerjarige contracten/inzetgaranties of (gedeeltelijke) vergoeding van meerkosten om investeringen door aannemers te stimuleren. ➤ Neem als opdrachtgever een actieve rol in gebiedsgerichte energievoorziening: Energiescans, faciliteren laadmogelijkheden (zoals laadplein), stem af met netbeheerders/stroomleveranciers over flexibele of tijdelijke oplossingen/contracten.	➤ Tijdig in kaart brengen van energie en vermogensvraag en regelen laadinfrastructuur en logistiek voorkomt stilstand en terugval op conventioneel materieel. ➤ Voldoende tijd nodig voor opdrachtnemer.	➤ Verbeter monitoring & datakwaliteit: Werk met uniforme registratieprotocollen en dashboards om laadstrategie, accubehoeftes en inzet te optimaliseren en opschaling mogelijk te maken. ➤ Standaardiseer materieel & laadinfrastructuur: Uniforme stekkers, protocollen en modulaire systemen verminderen kosten en vergroten inzetbaarheid.	➤ Pas werkmethoden aan voor ZE-operatie: Plan fasering en logistiek rond laadprocessen; plaats strategische laadpunten. ➤ Investeer in kennis, training en cultuurverandering.

De ervaringen uit het TRANSENERGY-onderzoek laten zien dat ZE-bouwplaatsen technisch en operationeel haalbaar zijn, ook bij zware inzet van materieel en complexe logistiek. Uit de cases, metingen en interviews blijkt dat elektrisch materieel, batterijcontainers en gespecialiseerde laadpleinen in staat zijn om continuïteit en productiviteit te bieden. Voorwaarde is wel dat keuzes kunnen worden afgestemd op het type project en op de energie- en logistieke randvoorwaarden die daarbij horen. Deze technische haalbaarheid betekent echter niet automatisch dat emissieloos bouwen in de praktijk probleemloos tot

uitvoering komt. In meerdere projecten wordt duidelijk dat organisatorische aspecten, voorbereiding en energievoorziening meer bepalend zijn voor succes dan de techniek zelf.

Een belangrijke conclusie is dat emissieloos bouwen alleen realistisch en uitvoerbaar wordt wanneer het vroegtijdig in de projectvoorbereiding wordt geborgd. In verschillende cases bleek dat ZE-ambities niet werden gehaald omdat vermogensbehoefte, netaansluitingen, laadcapaciteit of bufferoplossingen te laat in het proces werden meegenomen. Hierdoor moesten aannemers alsnog terugvallen op dieselmaterieel. Daartegenover tonen de cases Harderwijk en ProRail aan dat wanneer emissieloos bouwen al tijdens het ontwerp en de aanbesteding wordt meegenomen, de benodigde randvoorwaarden wel tijdig gerealiseerd kunnen worden en ZE-uitvoering daadwerkelijk haalbaar is. Door emissieloze inzet in de uitvraag, het ontwerp en de planning te verankeren, neemt de kans op succesvolle praktijkuitvoering substantieel toe.

In de huidige praktijk ligt de verantwoordelijkheid voor energievoorzieningen grotendeels bij de aannemer. Omdat deze vaak pas laat in beeld komt, is het in veel gevallen te laat om nog een passende energie-infrastructuur te organiseren, zeker voor zwaar materieel. Dit vraagt om een verschuiving of ten minste een gedeelde verantwoordelijkheid, waarbij de opdrachtgever actiever een faciliterende en regisserende rol speelt wanneer nodig. De case Harderwijk toont dat een opdrachtgever die een laadhub faciliteert de uitvoering met elektrisch materieel aanzienlijk eenvoudiger maakt. Ook laat de ProRail-case zien hoe een opdrachtgever, door in samenwerking met de aannemer toegang tot een onderstation te regelen en een laadcontainer te faciliteren, een deel van de organisatorische complexiteit kan wegnemen; al was dit wel een kostbare en complexe oplossing. Het structureel organiseren van energievoorzieningen moet daarom worden beschouwd als een gezamenlijke opgave, waarin de opdrachtgever randvoorwaarden borgt en de aannemer optimaliseert binnen die randvoorwaarden. Indien de aannemer voldoende tijd heeft om het zelf te organiseren, is de faciliterende rol van de opdrachtgever beperkter of niet nodig.

Een ander belangrijk aspect is betrouwbare monitoringsdata. Goede data over inzet, energiegebruik, laadbeurten en batterijstatus bieden essentiële informatie voor operationele planning, optimalisatie van laadstrategieën, dimensionering van aansluitwaarden en het voorspellen van energiebehoefte in toekomstige projecten. In de praktijk blijkt de datakoppeling tussen systemen echter vaak problematisch. In Harderwijk konden energiedata en inzetlogs niet goed aan elkaar worden gekoppeld, terwijl in de ProRail-case laadtags niet waren verbonden aan specifieke machines. Daardoor wordt optimalisatie bemoeilijkt en blijven leerervaringen beperkt. In de Dijkversterkingscase zijn de energiegebruiken juist in veel detail bekend. Al is het uiteindelijke energiegebruik ook sterk afhankelijk van het type inzet. Voor een nog betere monitoring zouden ook activiteiten gemonitord moeten worden.

Daarnaast toont het onderzoek dat aannemers in het algemeen positief staan tegenover de transitie en beschikken over toenemende expertise en beschikbaar materieel. De bereidheid is aanwezig, maar de randvoorwaarden moeten gelijke tred houden. Opdrachtgevers kunnen hierbij een versterkende rol vervullen, bijvoorbeeld door tijdelijke energie-infrastructuur te faciliteren, dekking van (een deel van de) meerkosten, vergunningen en gunningen te versnellen en laadcapaciteit op of nabij bouwplaatsen te coördineren. Hiermee ontstaat een gelijk speelveld waarin aannemers niet individueel hoeven te investeren in project-specifieke energievoorzieningen die voor hen financieel of organisatorisch niet haalbaar zijn.

Een blijvende uitdaging ligt in het emissieloos organiseren van de logistieke keten rondom de bouwplaats. Leveranciers beschikken nog niet altijd over elektrische vrachtwagens, waardoor materiaaltransport vaak niet emissieloos kan plaatsvinden. Ook zijn er vaak diverse

onderaannemers, wat het geheel complexer maakt. Al zijn er ook voorbeelden waar dit wel gebeurt. Dit onderstreept dat emissieloos bouwen niet kan worden beperkt tot de bouwplaats zelf. Ketenpartners moeten worden meegenomen in de voorbereiding, planning en eisenstelling. Alleen dan kan de ambitie van volledig emissieloze bouwprojecten worden gerealiseerd.

Tot slot blijkt uit de praktijk dat innovaties zoals elektrische machines, laadhubs en batterijlogistiek weliswaar technisch geslaagd zijn, maar economisch pas schaalbaar worden wanneer marktpartijen voldoende zekerheid en voorspelbaarheid ervaren. Opschaling vraagt om een stimulerend beleidskader waarin volume, continuïteit en afzetzekerheid worden geborgd. Bijvoorbeeld via meerjarige aanbestedingen, standaarden voor energie-infrastructuur en ondersteunende regelingen.

Aanbevelingen

Op basis van deze bevindingen wordt aanbevolen om emissieloos bouwen concreet en toetsbaar te verankeren in de vroege fase. Hierbij helpen bijvoorbeeld energiescans met beschikbare laadcapaciteiten in de omgeving en verwachte vermogensvraag van het project, voorafgaand aan de aanbesteding. Door deze randvoorwaarden vroeg te bepalen, wordt voorkomen dat de uitvoering later afhankelijk wordt van ad-hoc oplossingen of noodgedwongen terugvalt op conventioneel materieel. Ook draagt een vroege borging van energievoorziening bij aan realistischere planningen voor zowel netaansluitingen als alternatieve laadvoorzieningen.

Ook op het gebied van aanbesteding is verbetering mogelijk. Opdrachtgevers doen er goed aan om duidelijke, realistische en voorspelbare ZE-uitvragen te formuleren, waarbij zij waar nodig (een deel van) de meerkosten vergoeden en zekerheid bieden via meerjarige inzetgaranties of gunningsvoordelen. Dit bevordert investeringsbereidheid bij aannemers.

Daarnaast is het essentieel dat energievoorziening niet langer uitsluitend wordt beschouwd als verantwoordelijkheid van de aannemer. Aangezien aannemers vaak pas laat in beeld komen en daardoor onvoldoende tijd hebben om een passende energie-infrastructuur te realiseren, is het wenselijk dat opdrachtgevers een actievere, faciliterende rol op zich nemen. Dit kan bijvoorbeeld door het aanbieden van tijdelijke laadhubs, het coördineren met netbeheerders/stroomleveranciers over aansluitmogelijkheden (al dan niet via flexibele contracten, zoals tijdgebonden contracten) of het gezamenlijk organiseren van andere laadoplossingen.

Verder is een verbetering van monitoring en datakwaliteit cruciaal. Dashboards en gestandaardiseerde registratieprotocollen kunnen hierin een rol spelen. Zonder betrouwbare data blijven onzekerheden bestaan over daadwerkelijke energiebehoefte, benutting van materieel en optimale laadstrategieën, wat opschaling belemmert.

Standaardisatie van laadinfrastructuur en ZE-materieel is eveneens noodzakelijk om compatibiliteitsproblemen te verminderen. Uniforme laadprotocollen, stekkertypen, communicatie-interfaces en modulaire laadsystemen zorgen ervoor dat materieel en infrastructuur breder inzetbaar worden en dat de kosten dalen.

In de uitvoering vraagt emissieloos bouwen om aangepaste werkmethoden. Planning, fasering en logistiek moeten rekening houden met laadprocessen, beschikbaar laadvermogen en transport van accu's. Strategisch geplaatste laadpunten dicht bij de bouwlocatie kunnen stilstand verminderen en productiviteit verhogen. Daarnaast is het

belangrijk om te investeren in kennisontwikkeling, training en cultuurverandering binnen organisaties.

Tot slot vraagt de transitie naar emissieloos bouwen om een beleidskader dat opschaling stimuleert. Innovaties zoals batterijlogistiek, laadpleinen en zware elektrische machines hebben hun technische waarde bewezen, maar worden pas economisch aantrekkelijk wanneer marktpartijen voldoende schaal, continuïteit en voorspelbare afzet ervaren. Door meerjarige contracten, gebiedsgerichte laadinfrastructuur en ondersteunende stimuleringsregelingen te hanteren, kunnen opdrachtgevers en overheden bijdragen aan een stabiele markt waarin emissieloze bouw structureel kan groeien en concurreren met conventionele oplossingen.

Referenties

- [1] Natuur & Milieu, „Belemmeringen bij de inzet van elektrische mobiele werktuigen,” 2019.
- [2] TNO, „Schoon en Emissieloos Bouwen: Opties voor laad- en tankinfrastructuur voor mobiele werk-, wegvoer-, spoorvoer- en vaartuigen voor de bouwsector. TNO-2022-NOT-100345396,” 2022.
- [3] Berenschot, „Evaluatie Convenant SEB. Samen op weg naar Schoon en Emissieloos Bouwen,” 2025.
- [4] TNO, „TRANSENERGY - Conceptueel model en case study ontwerp. TNO 2024 P11731.,” 2024.
- [5] TNO, „Assessment of sustainable charging operations of Mekante Diek's construction equipment. TNO 2024 R12111,” 2025.
- [6] Gemeente Amsterdam, „Uitvoeringsagenda 2025 Schone Mobiele Werktuigen”.
- [7] Harderwijkse Zaken, „Waterfront Fase 3 wordt emissieloos woonrijp gemaakt,” 16 februari 2023. [Online]. Available: <https://www.harderwijksezaken.nl/nieuws/waterfront-fase-3-wordt-emissieloos-woonrijp-gemaakt>. [Geopend 16 januari 2026].
- [8] Gemeente Harderwijk, „Informatiebulletin CO2-prestatieladder oktober 2023,” oktober 2023. [Online]. Available: https://www.harderwijk.nl/fileadmin/Site_Harderwijk/documenten/projecten/Nieuwsbrief_CO2_prestatieladder_oktober_2023.pdf. [Geopend januari 2026].
- [9] GWW Totaal, „Boskalis Nederland werkt emissieloos aan Harderwijks Waterfront,” GWW Totaal, mei 2023. [Online]. Available: <https://www.gwwtotaal.nl/2023/05/30/boskalis-nederland-werkt-emissieloos-aan-harderwijks-waterfront/>. [Geopend januari 2026].
- [10] Emissieloos Netwerk Infra, „Update ENI TCO tool,” 16 december 2024. [Online]. Available: <https://www.emissieloosnetwerkinfra.nl/actueel/91/update-eni-tco-tool>. [Geopend 7 januari 2026].
- [11] FIER Sustainable Mobility, „De Bouwplaats van Morgen - Total Cost of Ownership (TCO) van de elektrische graafmachine,” 2024.
- [12] G. Vreemann, „Machines doen het goed, beloning en laden zijn de uitdagingen: Evaluatie Staad-project Proeftuin Elektrische machines voor De Bouwplaats van Morgen,” *Grondig: vakblad voor de Cumelasector, specialisten in groen en infra*, pp. 29 - 33, 9 2024.

Ondertekening

TNO › Mobility & Built Environment › Den Haag, 26 juni 2026

Fieke Beemster
Research Manager

Pim van Mensch
Auteur

Bijlage A

Analyse Laadprofiel ProRail door ElaadNL

Hieronder volgt een analyse op het laadprofiel van de ProRail-case (zie Hoofdstuk 6). Onderdeel van de analyse is onder andere hoe “slim laden” in deze case toegepast zou kunnen worden. De analyse is volledig uitgevoerd door ElaadNL en in presentatievorm gedocumenteerd. Onderstaand is de presentatie opgenomen.



Disclaimer



De gegevens, data en inzichten verwerkt in de ElaadNL adviezen en rapportages zijn een versimpelde weergave, bedoeld om een beeld te schetsen en mogelijke gevolgen daarvan. De informatie is gebaseerd op aannames en uitgangspunten over actueel en toekomstig gebruik, gedrag en beïnvloedingsfactoren, waarmee het een momentopname en daarmee indicatief is. De actuele en toekomstige situatie kan dus afwijken van hetgeen medegedeeld is. U kunt hier geen rechten aan ontlelen. ElaadNL aanvaardt geen aansprakelijkheid voor beslissingen of acties die worden genomen op basis van deze informatie. Neem voor actuele informatie die relevant is voor uw situatie altijd contact op met ElaadNL via uw contactpersoon.

Tot slot, willen wij u ook erop wijzen dat - in aanvulling op het voorgaande - door de snel ontwikkelende stand der techniek binnen ons werkveld, de inhoud van adviezen en rapportages slechts een geldigheid hebben van 24 maanden.

Dataset



De inputdata voor deze analyse bestaat uit laaddata voor de periode jan. t/m okt. 2025.

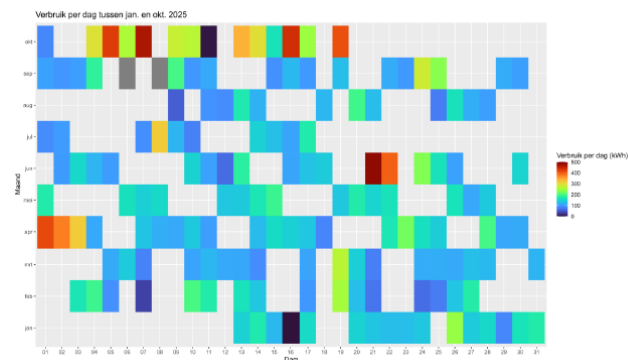
De dataset is vertrouwelijk ontvangen van ProRail ten behoeve van deze analyse.

De dataset bevat vier kenmerken per laadsessie;

1. Sessie ID
2. Starttijd
3. Eindtijd
4. Geladen energie (kWh) per sessie.

In totaal zijn 223 unieke sessies opgenomen in de dataset met een gemiddelde e-vraag per sessie van 115 kWh.

Figuur hiernaast toont het dagelijkse verbruik.



Duur en energievraag per laadsessie



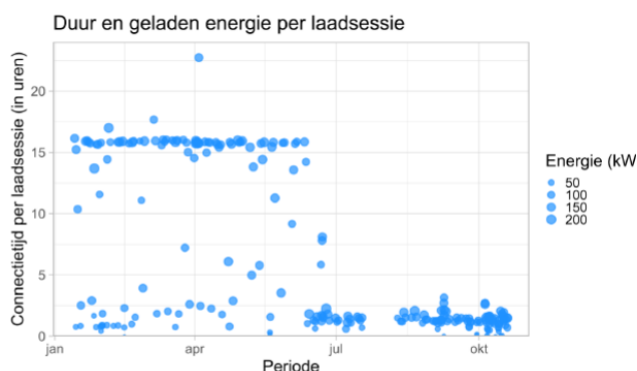
Figuur toont de verdeling van connectietijden (tijdsduur waarin een bouwmaachines gekoppeld aan een laadpunt) en de geladen energie in kWh per laadsessie over de tijd heen.

Opvallend is dat laadsessies vanaf medio juni 2025 over het algemeen veel kortere connectietijden hebben. Het lijkt erop dat de meeste laadsessies nog op de zelfde dag eindigen.

Gem. connectietijd voor 15 juni: 10,6 uur

Gem. connectietijd na 15 juni: 1,4 uur

Dit terwijl we geen significante verschillen zien in de geladen energie per laadsessie.



Start- en stoptijden van laadsessies



Figuur toont de verdeling van de start- en stoptijden van alle laadsessies in de dataset.

Uit de gegevens blijkt dat de piek in starttijden rond 15:30 uur valt.

De meeste laadsessies worden beëindigd rond 07:15 uur 's ochtends.

Opvallend is dat laadsessies die tussen 15:00 en 16:00 uur starten, gemiddeld de langste connectietijden kennen: deze sessies duren bijna 9 uur.



Laadvermogen



Om een laadprofiel te kunnen bepalen, dient de dataset eerst te worden getransformeerd naar verbruik per 15-minuten interval. Hiervoor is het voorstel om het geladen energieverbruik per sessie te delen door het maximale laadvermogen van de laders.

Uit de dataset blijkt dat het maximale laadvermogen van de laders ongeveer 150 kW bedraagt.

Dit maximale vermogen is afgeleid uit de volgende berekening, gebaseerd op een specifieke laadsessie kenmerken.

Laadvermogen (kW) =

geladen energie (90 kWh) / connectietijd (0,6 uur)

ID	Startdatum	Einddatum	Energie (kWh)
267795211	2025-07-07 09:30:31	2025-07-07 10:06:34	90,015

Laadprofiel

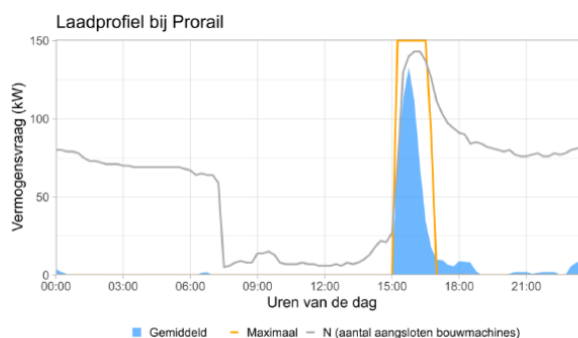


Uitgaande van een aanname van 150 kW is de laaddataset vertaald naar een geschat laadprofiel per laadtransactie.

De figuur hiernaast toont het geaggregeerde laadprofiel, opgebouwd uit individuele laadprofielen per laadsessie.

In de figuur worden drie indicatoren getoond;

- De grijze lijn toont het **totale aantal gekoppelde bouwmachines** aan de laadpunten in de periode jan. t/m okt.. Dit geeft een gemiddeld beeld van wanneer machines beschikbaar zijn om te laden.
- De oranje lijn geeft het **maximaal gemeten laadvermogen** weer.
- Blauwe vlakke geeft het **gemiddelde laadprofiel** weer. Dus over het gehele periode bekeken zien we dat **meer dan 70%** van de totale energievraag tussen 15:00 – 17:00 uur wordt geladen. Dit terwijl de bouwmachines gedurende de avond/nacht beschikbaar zijn om het laden.



* Het gemiddelde laadprofiel is berekend voor alle kwartierintervallen waarvoor minimaal 50 metingen in de dataset beschikbaar zijn. Op deze manier wordt voorkomen dat een vertekend of niet-representatief gemiddeld profiel ontstaat.

Slimme laadprofiel

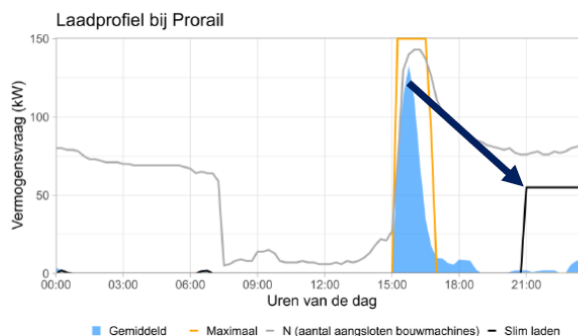


Binnen het huidige gemiddelde laadprofiel is er aanzienlijke ruimte om de vermogensvraag te verschuiven naar latere tijdstippen en om met een lager vermogen te laden.

In het geaggregeerde laadprofiel is tevens een scenario voor slim laden (zwarte lijn) opgenomen, gebaseerd op twee duidelijke uitgangspunten:

- De vermogensvraag in de piekperiode tussen 15:00 en 21:00 uur wordt volledig verschoven naar de periode na 21:00 uur.
- Laden vindt plaats met een maximaal vermogen van 55 kW (3x80A-aansluiting).

Zelfs onder deze relatief strikte ('extreme') aannames kan ruimschoots worden voldaan aan het gemiddelde laadprofiel.



Bijlage B

TRANSENERGY Deep Dive door Skoon Energy

Hieronder volgt een detailanalyse van vijf uiteenlopende bouwplaatsen en hun energievoorziening. Aan de hand van energieprofielen is beschreven met welke emissie-arme of emissieloze energieoplossingen invulling gegeven kan worden aan de energievraag. Aanvullend is beschreven wat bij die oplossingen en typen projecten barrières en succesfactoren zijn. Ook is een inschatting van de verwachte kosten per kWh gegeven. De analyse is volledig uitgevoerd door Skoon Energy en in een rapportage gedocumenteerd. Onderstaand is de rapportage opgenomen. Deze analyse vult aan op de door TNO uitgevoerde analyses in hoofdstuk 7 van deze rapportage.

TransEnergy Deep Dive

27-01-2026



1. Introductie

Dit resultatenrapport beschrijft de bevindingen uit een analyse van vijf voorbeeld bouwplaatsen, waarbij per bouwplaats een energieprofiel is opgesteld met Skoon's simulatie software.

Het doel van dit rapport is om inzicht te geven in:

1. De aard en omvang van de energievraag op verschillende typen bouwplaatsen;
2. De bijpassende energieoplossingen die in de praktijk uitvoerbaar zijn;
3. De belangrijkste barrières en succesfactoren bij implementatie;
4. Een indicatieve bandbreedte van kosten per geleverde kilowattuur (€/kWh).

De vijf cases zijn zodanig gekozen dat er sprake is van een mix van binnenstedelijke en buitenstedelijke projecten. Daarnaast is er een mix van kleinere en grotere projecten. Eén case is expliciet opgenomen met een focus op stationaire bronnen (bijvoorbeeld een beschikbare netaansluiting of een semi-permanente set-up op één locatie).

De analyse laat zien dat het succes van emissieloos bouwen afhangt van de beschikbaarheid van energiesystemen (zoals batterijen of schone generatoren), maar ook van de mate waarin vraag en aanbod operationeel op elkaar aansluiten. Dit vraagt om tijdige profilering van de energievraag voor goed inzicht, duidelijke verantwoordelijkheden op de bouwplaats, en een uitvoerbaar logistiek en veiligheidsplan.

2. Opbouw rapport

2.1 Doel

Het doel van dit rapport is om projectpartners en andere geïnteresseerden inzicht te geven in de praktische mogelijkheden en randvoorwaarden voor energievoorziening op bouwplaatsen, met nadruk op emissiearme of emissieloze oplossingen. Dit rapport is bedoeld als resultaatdocument dat tevens kan dienen als input voor vervolgp projecten, aanbestedingen en implementatieplannen.

2.2 Afbakening

De energieprofielen zijn opgesteld op basis van input en aannames uit de markt. De data is geanonimiseerde input vanuit bestaande projecten of plannen.

2.3 Definities

In dit rapport worden de volgende definities gebruikt:

This document is for information purposes only. No rights can be derived from its content. ²

Item	Definitie
Energieprofiel	Een tijdreeks van het elektrische vermogen (kW) en de energie (kWh) die op de bouwplaats benodigd is, uitgesplitst naar tijd (bijv. per kwartier of per uur).
Vermogen (kW)	De momentane vraag of levering van elektriciteit.
Energie (kWh)	De totale hoeveelheid elektriciteit over een periode.
Mobiele energieoplossing	Een verplaatsbare energiebron of opslag (bijv. batterijcontainer of batterijtrailer) die op meerdere locaties kan worden ingezet.
Stationaire bron/opstelling	Een energievoorziening die gedurende langere tijd op één locatie staat, vaak gekoppeld aan een vaste aansluiting of semi-permanent ingericht.
Inputvermogen	Het vermogen waarmee een batterij of laadplein kan worden geladen (bijv. vanuit netaansluiting).
Outputvermogen	Het vermogen dat beschikbaar is voor gebruikers (bijv. laders, bouw materieel, keten).
Kosten per kWh	De totale kosten van energievoorziening gedeeld door de daadwerkelijk geleverde energie op de bouwplaats (inclusief eventuele huur/afschrijving, logistiek, beheer en energie-inkoop).
Maximale footprint	De maximale benodigde vloeroppervlakte (in m²) die het systeem inneemt tijdens gebruik.

2.4 Werkwijze

Voor elke case is een energieprofiel opgesteld met Skoon's simulatie software, genaamd 'Decision Tool'. Op basis van dit profiel is vervolgens een technisch passende energieoplossing beschreven. Daarbij is per case gekeken naar:

1. Invulling van het energie-aanbod;
2. Barrières en succesfactoren;
3. Implicaties voor kosten per kWh;
4. Logische vervolgstappen richting uitvoering.

3. Resultaten per case

In dit hoofdstuk staan de vijf cases centraal. Per case worden dezelfde onderdelen behandeld zodat vergelijking en hergebruik mogelijk is.

This document is for information purposes only. No rights can be derived from its content. ³

3.1 Case 1 – Buitenstedelijk wegenbouwproject (groter project)

3.1.1 Projectcontext en werkzaamheden

Deze case betreft een buitenstedelijk wegenbouwproject met werkzaamheden zoals asfalteren, verkeersmaatregelen, tijdelijke ketenvoorzieningen, terreinverlichting en open ontgraving. Het project is tijdelijk van aard en wordt gefaseerd uitgevoerd over een langere tracélengte.

Kenmerkend voor dit type project is dat:

- de energievraag zich verplaatst met het werkfront;
- werkzaamheden grotendeels plaatsvinden binnen een dagvenster (bijvoorbeeld 07:00–17:00);
- er sprake is van een combinatie van continuverbruik (keten, verlichting, pompen) en kortdurende vermogenspieken (bij gelijktijdig laden van materieel of inzet van elektrisch zwaar materieel).

Typisch ingezet materieel binnen dit type wegenbouwproject omvat:

- Elektrische graafmachines (20–30 ton): motorvermogen ca. 80–150 kW, inzet 6–8 uur per dag
- Asfaltmachines (elektrisch/hybride ondersteund): vermogensvraag ca. 50–120 kW tijdens actieve inzet
- Mobiele pompen (bemaling/ontwatering): continuverbruik ca. 5–10 kW, vaak 24/7 actief
- Bouwketen en voorzieningen: ca. 10–25 kW continu (verwarming/koeling, kantoorfuncties)
- Terreinverlichting: ca. 5–20 kW, afhankelijk van omvang en seizoensinvloed
- Laadinfrastructuur voor klein elektrisch materieel en voertuigen.

De dominante energievraag binnen deze case wordt primair bepaald door:

1. Laadsessies van elektrisch materieel – deze veroorzaken de hoogste vermogenspieken (tot ~115 kW), maar zijn relatief kortdurend;
2. Elektrisch zwaar materieel (zoals graafmachines) – bepalend voor het gemiddelde vermogen tijdens werkuren;
3. Continuverbruikers (pompen, keten) – deze vormen de stabiele ondergrens van circa 60 kW buiten werkuren.

Door het lineaire karakter van het project is flexibiliteit in plaatsing en verplaatsing van energie-assets essentieel.

This document is for information purposes only. No rights can be derived from its content. ⁴

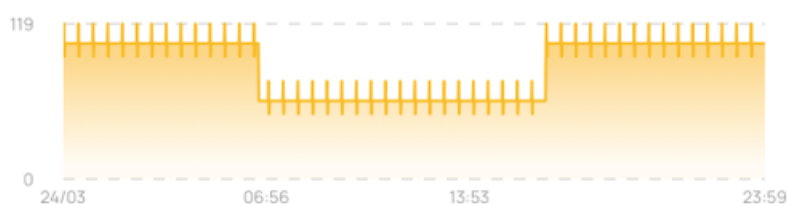
3.1.2 Energieprofiel (Decision Tool)

Het energieprofiel laat een patroon zien met een duidelijk dagvenster en pieken rondom intensieve activiteiten. De kernwaarden zijn: gemiddeld vermogen tijdens werkzaamheden 104kW, gemiddeld vermogen buiten werk uren 60kW, piekvermogen 119 kW, totale energieverbruik per dag is 1900 kWh, maximale aaneengesloten piekduur 0.25 uur, en benodigd outputvermogen voor laadsessies 115 kW.

De volgende waarden zijn bepalend voor het energieprofiel.

Item	Waarde	Eenheid	Notitie
Gemiddeld vermogen	75	kW	-
Gemiddeld energie verbruik	1900	kWh	-
Maximale footprint	16	m ²	-

Belastingprofiel [kW]



3.1.3 Voorgestelde energieoplossing(en)

De energievoorziening wordt ingevuld via een hybride configuratie bestaande uit een aggregaat in combinatie met mobiele batterijopslag.

Het uitgangspunt is dat de batterij als primaire energiebron fungeert en gedurende de dag de vermogensvraag afdekt. Het aggregaat wordt alleen ingezet om de batterij bij te laden wanneer het laadniveau onder een vooraf ingestelde grens komt of wanneer de energievraag het batterijvermogen structureel overstijgt.

Met 'primaire energiebron' wordt bedoeld dat alle afname via de batterij verloopt. Dit betekent dat het aggregaat niet direct de verbruikers voedt, maar uitsluitend wordt ingezet om de batterij op te laden. Hierdoor kan het aggregaat steeds op een optimaal en efficiënt vermogensniveau opereren, zonder langdurig op laag vermogen te draaien, wat inefficiënt zou zijn.

This document is for information purposes only. No rights can be derived from its content. ⁵

De voorgestelde configuratie bestaat uit:

- Aggregaatvermogen: 115 kW
- Nominale batterijcapaciteit: 540 kWh
- Batterij-omvormervermogen: 270 kW
- Laadinfrastructuur: AC 400 V + Powerlock + CEE (32A, 63A, 125A)
- Maximaal gelijktijdig laadvermogen: 270 kW

3.1.4 Onderbouwing configuratie

De batterijcapaciteit van 540 kWh maakt het mogelijk om meerdere uren autonoom te opereren zonder direct bij te laden. Gezien de dagbehoefte van 1.900 kWh betekent dit dat de batterij meerdere cycli per dag doorloopt, waarbij het aggregaat gefaseerd bijlaadt op efficiënte vermogensniveaus.

De keuze voor 540 kWh is gebaseerd op optimalisatieberekeningen met behulp van onze software. Hieruit blijkt dat deze capaciteit de beste balans biedt tussen efficiëntie, emissiereductie en kosten. Een grotere batterijcapaciteit leidt slechts tot beperkte extra besparingen, terwijl de investeringskosten significant toenemen, waardoor dit in dit geval niet kosteneffectief is.

Het omvormervermogen van 270 kW biedt ruime marge ten opzichte van het gemeten piekvermogen van 119 kW. Dit voorkomt spanningsval, biedt flexibiliteit bij toekomstige opschaling en maakt het mogelijk om additionele laadsessies tijdelijk te accommoderen.

Indien gewenst kan het aggregaat worden gevoed met HVO100 of biogas. Alternatief kan een waterstofaggregaat worden ingezet, mits beschikbaar en logistiek haalbaar. Hierbij moet rekening worden gehouden met kosten, brandstoflogistiek, leveringszekerheid en aanvullende veiligheidsmaatregelen.

3.1.5 Barrières in uitvoering

De uitvoering van een hybride energieoplossing op een buitenstedelijk wegenbouwproject wordt in de praktijk beïnvloed door ruimtelijke en logistieke beperkingen. De beschikbare ruimte langs het tracé is vaak beperkt door rijstroken, werkvakken en veiligheidszones, waardoor het positioneren van batterijcontainers en aggregaten zorgvuldig moet worden afgestemd. Door het gefaseerde karakter van het project zijn regelmatige verplaatsingen van energie-assets noodzakelijk, wat extra transport, hijsbewegingen en tijdelijke onderbrekingen van de energievoorziening met zich meebrengt.

Daarnaast vraagt de combinatie van batterij en aggregaat om actief energiemangement. Zonder goede instellingen en monitoring bestaat het risico dat het aggregaat langer draait dan noodzakelijk, wat leidt tot hogere kosten en emissies. Ook moeten aansluitingen en beveiligingen bij iedere (her)plaatsing

This document is for information purposes only. No rights can be derived from
its content. ⁶

correct worden uitgevoerd, wat in een omgeving met tijdsdruk een aandachtspunt blijft.

Tot slot vormt de organisatorische inbedding van energiemangement een barrière. Op veel bouwplaatsen is geen duidelijke rolverdeling rondom energiebeheer, waardoor onduidelijkheid kan ontstaan over monitoring, laadsessies en storingsopvolging. Zonder heldere afspraken over verantwoordelijkheden kan de benuttingsgraad van de oplossing achterblijven bij de technische mogelijkheden.

3.1.6 Succesfactoren

Succesvolle uitvoering wordt bepaald door:

1. Vroegtijdige validatie van het energieprofiel in relatie tot de werkplanning.
2. Duidelijke afspraken over energiemangement (wie monitort, wie beslist over bijladen, wie schakelt bij incidenten).
3. Gestandaardiseerde aansluitmethodiek en keuring bij iedere verplaatsing.
4. Inzet van remote monitoring voor inzicht in vermogensvraag, SOC en draaiuren.

Bij dit type project is vooral de combinatie van technische robuustheid en organisatorische discipline doorslaggevend.

3.1.7 Indicatieve bandbreedte kosten per kWh

De kosten per geleverde kWh worden primair bepaald door:

- Huur of afschrijving van batterij en aggregaat
- Brandstofkosten aggregaat
- Logistieke kosten (transport en plaatsing)
- Service en monitoring
- Benuttingsgraad van de batterij

Voor deze case wordt een bandbreedte verwacht van €0,60 tot €0,70 per kWh.

Bij hogere benuttingsgraad (meer kWh per dag) daalt de effectieve €/kWh. Wanneer de batterij vooral beschikbaar moet zijn voor zekerheid en minder frequent wordt benut, stijgt de kostprijs per kWh.

3.1.8 Volgende stappen

Voor verdere uitwerking zijn de volgende stappen noodzakelijk:

1. Validatie van het materieeloverzicht en definitieve loadprofiel in de Decision Tool.
2. Detailbepaling van plaatsingslocatie inclusief veiligheidsafstanden en kabelrouting.

This document is for information purposes only. No rights can be derived from its content. ⁷

3. Toetsing aan geldende emissie- en geluidseisen. Dit is sterk locatieafhankelijk en komt met name vaker voor bij projecten in stedelijke gebieden of in de nabijheid van Natura 2000-gebieden.
4. Vastlegging van het operationeel beheerproces (monitoring, interventie, herinbedrijfstelling bij verplaatsing).
5. Definitieve dimensionering van aggregaat en batterij op basis van actuele planning en eventuele opschaling van elektrisch materieel.

3.2 Case 2 – Buitenstedelijk kabels en leidingen (groter, lineair project)

3.2.1 Projectcontext en werkzaamheden

Deze case betreft een buitenstedelijk waterleidingproject met een lineaire werkstroom. De werkzaamheden bestaan uit ontgraving, leidinglegging, lassen, testen, bemaling en herstelwerkzaamheden. Het werkfront verplaatst zich dagelijks of wekelijks over langere afstand, waardoor de energievraag niet geconcentreerd is op één vaste locatie, maar meebeweegt met de voortgang van het project.

Kenmerkend voor dit type project is de aanwezigheid van meerdere tijdelijke sublocaties, waaronder ketenparken, bemalingspunten en laslocaties. Hierdoor ontstaat een gedistribueerde energievraag met zowel stationaire baseload (keten, verlichting, pompen) als mobiele vermogenspieken bij intensieve activiteiten. De energievoorziening moet daarom flexibel schaalbaar en eenvoudig verplaatsbaar zijn, zonder dat dit leidt tot langdurige onderbrekingen van de werkzaamheden.

Ingezet materieel en dominante energievraag

De energievraag wordt in belangrijke mate gestuurd door de combinatie van specialistisch materieel en de spreiding over meerdere locaties. Typisch ingezet materieel omvat:

- Elektrische of hybride graafmachines (20–40 ton): ca. 80–200 kW, inzet 6–10 uur per dag
- Lasapparatuur voor leidingverbindingen: ca. 10–50 kW per unit, vaak meerdere units gelijktijdig actief
- Test- en drukinstallaties: tijdelijke piekvermogens van 50–150 kW tijdens testfases
- Bemalingsinstallaties: ca. 10–50 kW per locatie, vaak continu in bedrijf (24/7)
- Ketenparken en verlichting: ca. 20–50 kW per sublocatie

Binnen deze case zijn er geen individuele machines die dominant zijn in de energievraag. In plaats daarvan wordt het profiel bepaald door drie samenhangende factoren:

1. Gedistribueerde gelijktijdigheid – met zes actieve sublocaties stapelen vermogens zich op tot een hoog totaalniveau;

This document is for information purposes only. No rights can be derived from its content. ⁸

2. Continuverbruik (met name bemaling en keten) – deze vormen een constante en substantiële baseload over de gehele dag;
3. Operationele pieken (lassen en testen) – zorgen voor tijdelijke verhogingen richting het piekvermogen van ca. 1200 kW.

De inzeturen van zwaar materieel liggen voornamelijk binnen reguliere werkuren, terwijl bemaling en een deel van de ketenvoorzieningen continu actief blijven. Dit resulteert in een energieprofiel met een hoge ondergrens en beperkte relatieve pieken, waarbij de benuttingsgraad van het systeem hoog is.

3.2.2 Energieprofiel (Decision Tool)

Het energieprofiel wordt gekenmerkt door een relatief hoge en stabiele basislast, gecombineerd met pieken als gevolg van gelijktijdige activiteiten op meerdere locaties. De kernwaarden zijn:

- Gemiddeld vermogen: ca. 900 kW
- Piekvermogen: ca. 1200 kW
- Dagelijks energieverbruik: ca. 9000 kWh
- Aantal gelijktijdige sublocaties: 6

De omvang van het vermogen wordt in deze case primair bepaald door de optelsom van meerdere gelijktijdige verbruikers, in plaats van één dominante piekbelasting.

3.2.3 Voorgestelde energieoplossing(en)

•

De energievoorziening wordt ingevuld via een hybride configuratie bestaande uit meerdere aggregaten in combinatie met mobiele batterijopslag systemen.

Het uitgangspunt is dat de batterijen als primaire energiebron fungeren en gedurende de dag de vermogensvraag afdekt. De aggregaten worden alleen ingezet om de batterij bij te laden wanneer het laadniveau onder een vooraf ingestelde grens komt of wanneer de energievraag het batterijvermogen structureel overstijgt.

De voorgestelde configuratie bestaat uit:

- Aggregaatvermogen: 2x 500 kVA
- Nominale batterijcapaciteit: 4x 420kWh
- Batterij-omvormervermogen: 4x 320kVA

Maximaal gelijktijdig vermogen: 2.280 kVA

De baseload wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door ketenvoorzieningen, verlichting en bemalingspompen. De pieken ontstaan bij gelijktijdige inzet van zwaar elektrisch materieel, zoals graafmachines, lasunits en transportmaterieel.

Het lineaire karakter van het project impliceert dat het systeem niet alleen technisch toereikend moet zijn, maar ook ontworpen moet zijn voor frequente herplaatsing en snelle herinbedrijfstelling.

3.2.4 Barrières in uitvoering

Bij lineaire projecten vormt de herhaalbaarheid van veilige aansluiting en aarding een kritische succesfactor. Door de frequente verplaatsing van systemen neemt de kans op fouten in kabelmanagement, fasering of beveiliging toe. Iedere herplaatsing vereist een volledige controle op aarding, beveiliging en vermogensinstellingen om storingen en veiligheidsrisico's te voorkomen.

Daarnaast is de fysieke werkruimte vaak beperkt door sleuven, afzettingen en verkeersmaatregelen. Dit beperkt de plaatsingsmogelijkheden van containers en distributiepunten en kan leiden tot langere kabellengtes, spanningsverliezen en verhoogd risico op beschadiging.

Tot slot zorgt de combinatie van meerdere sublocaties en verschillende onderaannemers voor organisatorische complexiteit. Zonder duidelijke afspraken over energiemangement, monitoring en interventie kan de benuttingsgraad van de energieoplossing lager uitvallen dan technisch mogelijk is.

3.2.5 Succesfactoren

Belangrijke succesfactoren zijn de standaardisatie van aansluitinterfaces en distributiepunten, waardoor herplaatsing snel en foutarm kan plaatsvinden. Een vaste procedure voor herinbedrijfstelling, inclusief controlelijsten voor aarding en beveiliging, vergroot de betrouwbaarheid van het systeem.

Daarnaast is de betrokkenheid van een servicepartij met remote monitoring en interventiemogelijkheden essentieel. Hiermee kan op afstand worden gestuurd op laadtoestand, inzet van aggregaten en vermogensverdeling over de verschillende aansluitpunten.

Het lineaire karakter van het project maakt het bovendien geschikt voor planning op basis van energieblokken, waarbij per fase vooraf wordt bepaald hoeveel capaciteit nodig is en wanneer opschaling of afschaling plaatsvindt.

3.2.6 Indicatieve bandbreedte kosten per kWh

Voor dit type project wordt een bandbreedte van €0,80 tot €0,90 per kWh verwacht. De hogere kostprijs ten opzichte van meer stationaire projecten wordt voornamelijk

veroorzaakt door logistieke componenten, waaronder transport, hijswerkzaamheden en herinbedrijfstelling bij verplaatsing.

De uiteindelijke kosten zijn sterk afhankelijk van:

- De verplaatsfrequentie
- De benuttingsgraad van de batterijcapaciteit
- De beschikbaarheid van elektriciteit uit de netaansluiting
- De inzetduur van aggregaten

3.2.7 Volgende stappen

Voor verdere concretisering van de energieoplossing zijn de volgende stappen noodzakelijk: het vaststellen van de daadwerkelijke verplaatsfrequentie per projectfase, het definiëren van veilige en logistiek haalbare plaatsingspunten, en het contracteren van een service- en monitoringpartij voor operationele continuïteit.

Daarnaast wordt aanbevolen om het energieprofiel per fase nader te valideren met projectplanning en materieelinzet, zodat overdimensionering wordt voorkomen en de kostenefficiëntie wordt gemaximaliseerd.

3.3 Case 3 – Utiliteitsbouw (groter project; focus op stationaire bronnen)

3.3.1 Projectcontext en werkzaamheden

Deze case betreft een utiliteitsbouwproject met een langere doorlooptijd en een relatief stabiele bouwlocatie. De werkzaamheden omvatten ruwbouw, montage, installatiewerkzaamheden en logistieke bewegingen op het bouwterrein. In tegenstelling tot lineaire projecten blijft de energievraag grotendeels geconcentreerd op één locatie.

Kenmerkend voor dit type project is een relatief hoge en constante baseload, veroorzaakt door bouwketen, verlichting, beveiligingsinstallaties en elektrisch gereedschap. Daarnaast treden vermogenspieken op bij inzet van hijskranen, bouwliften en logistieke handelingen. Door de vaste locatie en langere looptijd is het mogelijk om een meer structurele energieoplossing te implementeren, met nadruk op optimalisatie van netcapaciteit en buffering.

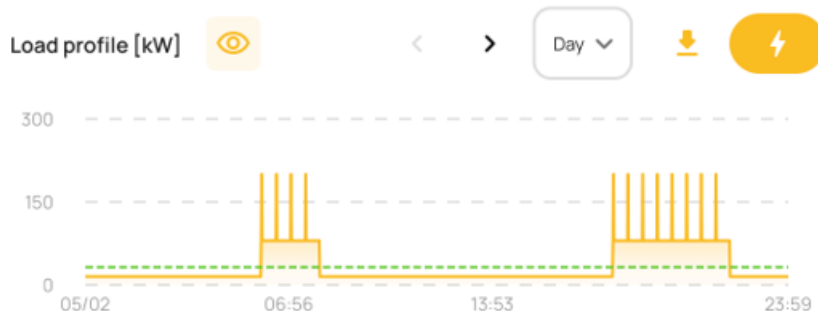
3.3.2 Energieprofiel (Decision Tool)

Kernwaarden: baseload 80 kW, piek 200 kW, dagenergie 775 kWh, avond/nachtverbruik 15 kW, en gewenste beschikbaarheid van laadinfra 06:00 – 08:00 en 18:00 – 22:00.

De volgende waarden zijn bepalend voor het energieprofiel.

This document is for information purposes only. No rights can be derived from its content. ¹¹

Item	Waarde	Eenheid	Notitie
Gemiddeld vermogen	80	kW	-
Gemiddeld energie verbruik	775	kWh	-
Maximale footprint	8	m ²	-



Het profiel kenmerkt zich door voorspelbaarheid en een duidelijke scheiding tussen dagbelasting en avond-/nachtverbruik. Dit maakt het mogelijk om energieopslag strategisch in te zetten als buffer tussen lage elektriciteit uit de netaansluiting en hogere piekbelasting.

3.3.3 Voorgestelde energieoplossing(en)

In deze case staat een stationaire energiebron centraal, bijvoorbeeld een bestaande of tijdelijke netaansluiting. De batterij wordt ingezet als semi-permanente buffer om piekvermogens op te vangen en om de benodigde netaansluitcapaciteit te beperken.

De voorgestelde configuratie bestaat uit:

- Netaansluiting: 32 kW
- Stationaire nominale batterijcapaciteit: 308 kWh
- Batterijvermogen: 230 kW
- Distributie: AC 400V met modulaire verdeelstructuur

De batterij laadt gedurende de dag en/of nacht op via de beperkte netaansluiting en levert vermogen tijdens piekmomenten. Hiermee kan een relatief kleine netaansluiting toch hogere vermogens leveren aan kranen, liften of laadpleinen.

De gekozen netaansluiting van 32 kW is gebaseerd op de uitgevoerde analyse, waaruit blijkt dat dit vermogen voldoende is voor de toepassing. Daarnaast wordt de aansluiting niet uitsluitend voor de bouwplaats gebruikt daarom was de

analyse uitgevoerd en daaruit volgde dat zelfs een deel van deze aansluiting voldoende zou zijn om de energiebehoefte te voorzien.

Indien het project meerdere power zones kent, kan worden gewerkt met kleinere mobiele satellietbatterijen die vanuit de centrale buffer worden gevoed. Dit vergroot de flexibiliteit zonder dat per zone een aparte netaansluiting nodig is.

3.3.4 Barrières in uitvoering

Een belangrijke barrière betreft het tijdig reserveren van ruimte binnen de bouwlogistiek. Omdat de batterij semi-permanent wordt opgesteld, moet deze vroeg in de bouwplanning worden ingepast. Indien dit pas later gebeurt, kan het moeilijk zijn om een geschikte, veilige en logistiek efficiënte plaats te vinden.

Daarnaast vraagt het stationaire karakter om een eenduidig beheerproces. De batterij wordt een integraal onderdeel van de bouwplaat infrastructuur. Zonder duidelijke afspraken over wie verantwoordelijk is voor afrekenen van stroom, monitoring en interventies kan onduidelijkheid ontstaan bij storingen of afwijkingen.

Tot slot vereist de afstemming met onderaannemers aandacht. Verschillende partijen hebben op verschillende momenten toegang nodig tot laadpunten of aansluitingen. Zonder goede planning en capaciteitsverdeling kunnen piekbelastingen ontstaan die hoger zijn dan geprofileerd.

3.3.5 Succesfactoren

De voorspelbaarheid van de planning vormt in deze case een belangrijke succesfactor. Doordat werkzaamheden en vermogensvraag relatief stabiel zijn, kan het energiemangement goed worden geïntegreerd in de dagelijkse bouwplaat organisatie.

Een hogere benuttingsgraad van de batterijcapaciteit draagt bij aan een gunstige kostprijs per kWh. Daarnaast maakt de vaste locatie het mogelijk om standaardisatie door te voeren in aansluitingen, verdeelkasten en monitoring.

Integratie van energiemangement in reguliere bouwplaat vergaderingen en werkvoorbereiding vergroot de operationele betrouwbaarheid en optimaliseert de inzet van beschikbare capaciteit.

3.3.6 Indicatieve bandbreedte kosten per kW

Voor dit type project wordt een indicatieve bandbreedte verwacht van €0,45 tot €0,50 per kWh. De relatief gunstige kostprijs ten opzichte van mobiele projecten wordt verklaard door:

- Minder logistieke verplaatsingen
- Hogere benuttingsgraad van batterijcapaciteit
- Betere voorspelbaarheid van het energieprofiel

- Beperkte inzet van aanvullende brandstofbronnen

De uiteindelijke kostprijs is afhankelijk van contractduur, benuttingsgraad en de verhouding tussen elektriciteit uit de netaansluiting en batterijontlading.

3.3.7 Volgende stappen

Voor verdere concretisering is detailafstemming nodig met uitvoerder en installateur over aansluiting, distributie en laadpleinconfiguratie. Ook dient het operationele beheerproces te worden vastgelegd, inclusief afrekening, procedures en rapportage.

Aanvullend wordt aanbevolen om het energieprofiel periodiek te toetsen aan de daadwerkelijke voortgang van de bouw, zodat capaciteit tijdig kan worden opgeschaald of afgebouwd indien nodig.

3.4 Case 4 – Civiele kunstwerken (Onderdoorgangen; piekgedreven)

3.4.1 Projectcontext en werkzaamheden

Deze case betreft de realisatie van civiele kunstwerken, in dit voorbeeld een onderdoorgang. Kenmerkend voor dit type project is dat werkzaamheden plaatsvinden binnen strikt gedefinieerde tijdvensters, bijvoorbeeld tijdens nachtelijke afsluitingen of tijdelijke verkeersomleidingen. Activiteiten omvatten onder meer hijswerkzaamheden, betonstorten, pompen, tijdelijke verlichting en inzet van zwaar materieel.

De energievraag is in dit type project niet continu hoog, maar sterk geconcentreerd rond specifieke kritieke momenten. Tijdens deze momenten is een betrouwbare en direct beschikbare energievoorziening essentieel. Onvoldoende beschikbaar vermogen kan leiden tot vertragingen, veiligheidsrisico's en aanzienlijke kosten.

Ingezet materieel en dominante energievraag

De energievraag wordt in deze case voornamelijk bepaald door zwaar, tijdelijk ingezet materieel dat gelijktijdig actief is tijdens uitvoeringsvensters. Typisch materieel omvat:

- Elektrische hijskranen of mobiele kraansystemen: ca. 50–150 kW tijdens hijsoperaties
- Betonpompen en trilnaalden: ca. 20–80 kW tijdens stortfasen
- Bemalingsinstallaties: ca. 10–30 kW, vaak gedurende de volledige uitvoeringsperiode actief
- Tijdelijke bouwverlichting (nachtwerk): ca. 10–25 kW
- Ondersteunend elektrisch gereedschap en installaties: ca. 5–20 kW

This document is for information purposes only. No rights can be derived from its content. ¹⁴

In tegenstelling tot lineaire of continue projecten wordt de energievraag hier gedomineerd door gelijktijdige inzet van zwaar materieel binnen een beperkt tijdsvenster. De belangrijkste bepalende factoren zijn:

1. Kritieke piekmomenten – meerdere zware verbruikers (zoals kranen en betonpompen) draaien gelijktijdig;
2. Tijdsdruk en beschikbaarheidseisen – energie moet direct en volledig beschikbaar zijn zonder opstartvertraging;
3. Beperkte spreiding van verbruik – vrijwel alle energie wordt verbruikt binnen het uitvoeringsvenster (bijv. nacht).

Er is in deze case sprake van een duidelijke dominante vraag vanuit zwaar materieel tijdens de piekuren, in tegenstelling tot projecten met een hoge baseload. Dit maakt de dimensionering van het energiesysteem primair afhankelijk van het piekvermogen en de betrouwbaarheid tijdens deze kritieke uren, in plaats van op gemiddelde belasting of dagverbruik.

3.4.2 Energieprofiel (Decision Tool)

Kernwaarden: piek 132 kW, piekduur 7 uur, dagenergie 1585 kWh, en kritieke beschikbaarheidsmomenten nacht.

De volgende waarden zijn bepalend voor het energieprofiel.

Item	Waarde	Eenheid	Notitie
Gemiddeld vermogen	100	kW	-
Gemiddeld energie verbruik	1585	kWh	-
Maximale footprint	16	m ²	-

Belastingprofiel [kW]



This document is for information purposes only. No rights can be derived from its content.

15

3.4.3 Voorgestelde energieoplossing(en)

Gezien de emissierestricties en de noodzaak tot hoge beschikbaarheid wordt een gecombineerde oplossing met waterstofaggregaat (fuel cell) en geïntegreerde batterij als voorkeursoptie beschouwd. Deze keuze is met name relevant voor projecten in of nabij Natura 2000-gebieden, waar strikte regelgeving geldt en geen uitstoot van emissies (zoals NO_x en CO₂) is toegestaan. In dergelijke contexten zijn volledig emissieloze energiesystemen vereist.

De toepassing van waterstofaggregaten (H₂-gensets) wordt in de praktijk met name overwogen en ingezet op langere projecten en vooral locaties waar een nulmissie-eis geldt en tegelijkertijd geen netaansluiting beschikbaar is. Dit maakt deze technologie specifiek geschikt voor tijdelijke of afgelegen projecten met strenge milieukaders.

De batterij fungeert als buffer voor directe vermogensvraag en zorgt voor stabilisatie van het systeem, terwijl het waterstofaggregaat de energievoorziening op langere piekmomenten ondersteunt. In tegenstelling tot de hybride oplossing beschreven in paragraaf 3.1.3, waarbij emissies worden gereduceerd maar niet volledig geëlimineerd, maakt deze configuratie het mogelijk om volledig emissievrij te opereren en daarmee te voldoen aan de geldende milieueisen.

Indicatieve configuratie:

- Gecombineerd vermogen: 200 kW
- Geïntegreerde nominale batterijcapaciteit: 120 kWh
- Brandstofvoorziening: waterstof
- Distributie: AC 400V met redundante vermogensverdeling

Door de combinatie van opwekking en opslag wordt voorkomen dat de energievoorziening afhankelijk is van één enkel component. Bij uitval of fluctuatie van de waterstof fuel cell kan de batterij tijdelijk het vermogen leveren, waardoor operationele risico's worden beperkt.

3.4.4 Barrières in uitvoering

Een belangrijke barrière is de beschikbare ruimte, deze is vaak beperkt. Werkzaamheden vinden plaats nabij water, onder brugdekken of binnen verkeerscorridors, waar veiligheid en bereikbaarheid prioriteit hebben. Dit beperkt de mogelijkheden voor positionering van energie-assets en stelt aanvullende eisen aan stabiliteit, aarding en fysieke afscherming.

Tot slot gelden strikte veiligheidseisen bij het gebruik van waterstof door de aanwezigheid van verkeer, publiek en mogelijk scheepvaart. De energieoplossing moet voldoen aan verhoogde eisen op het gebied van brandveiligheid, noodprocedures en fysieke beveiliging.

3.4.5 Succesfactoren

Een belangrijke succesfactor het passend maken binnen de vergunningsvoorwaarden en maatschappelijke verwachtingen.

Daarnaast is het inbouwen van operationele redundantie essentieel. Dit omvat niet alleen technische redundantie (buffering en back-up), maar ook duidelijke escalatieprocedures en vooraf geteste herstartprotocollen.

Tenslotte vergroot een integrale afstemming tussen werkvoorbereiding, uitvoerder en energiepartner de kans op succesvolle uitvoering binnen de beperkte tijdvensters.

3.4.6 Indicatieve bandbreedte kosten per kWh

Voor deze case wordt een indicatieve bandbreedte verwacht van €1,00 tot €1,15 per kWh. De relatief hogere kostprijs wordt verklaard door:

- Inzet van waterstof als emissievrije brandstof
- Verhoogde veiligheids- en redundantie-eisen
- De noodzaak tot maximale beschikbaarheid tijdens korte, kritieke vensters
- Lagere benuttingsgraad van assets buiten piekmomenten

Binnen deze bandbreedte is uitgegaan van het gebruik van groene waterstof, aangezien in deze case sprake is van een volledig emissieloze energiebehoefte. Hoewel grijze waterstof momenteel een lagere kostprijs kent, wordt deze optie hier niet als passend beschouwd vanwege de indirecte CO₂-uitstoot in de productieketen. Groene waterstof is op dit moment duurder, al neemt het prijsverschil geleidelijk af naarmate de markt zich verder ontwikkelt en opschaalt.

3.4.7 Volgende stappen

Voor verdere uitwerking zijn de volgende stappen noodzakelijk: het verfijnen van piekvermogens op basis van werkmethodiek en het uitvoeren van praktijktesten voor storingsafhandeling en andere procedures.

Aanvullend wordt aanbevolen om scenario-analyses uit te voeren voor afwijkende omstandigheden, zodat de energieoplossing robuust is onder verschillende uitvoeringsvarianten.

3.5 Case 5 – Binnenstedelijk project (kleiner; ruimte- en geluidsgedreven)

3.5.1 Projectcontext en werkzaamheden

Deze case betreft een binnenstedelijke bouwplaats met beperkte fysieke ruimte en hoge omgevingsgevoeligheid. De werkzaamheden vinden plaats in een dichtbebouwde omgeving, waar eisen ten aanzien van geluid, emissies, veiligheid en logistiek nadrukkelijk aanwezig zijn. Activiteiten omvatten onder meer

kleinschalige grondwerkzaamheden, montage, installatiewerk en tijdelijke voorzieningen.

Kenmerkend voor dit type project is dat de energievraag relatief beperkt is in absolute zin, maar dat de randvoorwaarden vanuit de omgeving bepalend zijn voor de gekozen oplossing. Werkzaamheden vinden vaak plaats binnen vaste toegangstijden, met aanvullende restricties in de avonden. Omgevingsmanagement speelt een centrale rol in de uitvoeringsstrategie.

Ingezet materieel en dominante energievraag

Binnen deze case wordt voornamelijk licht en middelzwaar elektrisch materieel ingezet, passend bij de schaal en de omgevingsrestricties. Typisch materieel omvat:

- Elektrisch handgereedschap en installatiematerieel: ca. 1–5 kW
- Kleine pompen of drainagevoorzieningen: ca. 1–5 kW
- Bouwketen en voorzieningen: ca. 2–5 kW (verwarming/koeling, verlichting, IT)
- Beperkte terreinverlichting: ca. 1–5 kW

De energievraag wordt in deze case niet gedomineerd door zwaar materieel of piekverbruik, maar door een lage, continue baseload vanuit voorzieningen en licht materieel. De belangrijkste bepalende factoren zijn:

1. Omgevingsrestricties – emissieloos en geluidsarm materieel is vaak een vereiste, wat de inzet van bijvoorbeeld aggregaten beperkt of uitsluit;
2. Beperkte ruimte (footprint) – compacte, geïntegreerde energiesystemen zijn noodzakelijk;
3. Voorspelbaar gebruiksprofiel – weinig pieken, waardoor het systeem efficiënt kan worden gedimensioneerd op gemiddeld verbruik.

In tegenstelling tot de andere cases is hier geen sprake van dominante individuele verbruikers of hoge gelijktijdigheid. De energievraag wordt primair bepaald door kleinschalig, continu gebruik, waarbij betrouwbaarheid en minimale omgevingsimpact belangrijker zijn dan piekvermogen.

3.5.2 Energieprofiel (Decision Tool)

De volgende waarden zijn bepalend voor het energieprofiel.

Item	Waarde	Eenheid	Notitie
Gemiddeld vermogen	4	kW	-
Gemiddeld energie verbruik	96	kWh	-

This document is for information purposes only. No rights can be derived from its content. ¹⁸

Item	Waarde	Eenheid	Notitie
Maximale footprint	16	m ²	-

Belastingprofiel [kW]



3.5.3 Voorgestelde energieoplossing(en)

De voorgestelde oplossing bestaat uit een compacte en stille mobiele hybrideopstelling, ontworpen voor minimale impact op de omgeving. De configuratie omvat:

- Batterijcapaciteit: 62 kWh
- Back-up aggregaatvermogen: 36 kW
- Zonnepanelen: 5,28 kWp

De batterij voorziet primair in de dagelijkse energievraag. Het aggregaat fungeert als back-up en wordt alleen ingezet wanneer de laadtoestand onder een vooraf ingestelde grenswaarde komt. De zonnepanelen leveren aanvullende energie en dragen bij aan vermindering van brandstofverbruik.

De oplossing is uitgevoerd als een geïntegreerd systeem waarin batterij, aggregaat en zonnepanelen binnen één systeem zijn samengebracht. Hoewel er ook kleinere varianten van dit type systeem beschikbaar zijn, is in dit geval gekozen voor een grotere configuratie vanwege de continue 24-uurs energievraag binnen het project. Deze operationele eis vraagt om voldoende opslagcapaciteit om betrouwbaarheid te garanderen.

De fysieke footprint van de installatie is daardoor vergelijkbaar met die van grotere projecten. Dit wordt primair gedreven door de benodigde capaciteit en bedrijfsduur. Indien de energievraag minder continu of intensief zou zijn geweest, had een compacter systeem met kleinere footprint volstaan.

In tegenstelling tot andere toepassingen (zoals 3.3), waar een back-up aggregaat niet noodzakelijk is omdat daar een netaansluiting beschikbaar was, is in deze case bewust gekozen voor een hybride systeem mét geïntegreerd aggregaat. De

continue energievraag (24/7) en het ontbreken van een netaansluiting maken een hoge leveringszekerheid essentieel. Het aggregaat borgt deze beschikbaarheid en voorkomt onderbrekingen wanneer de batterij onvoldoende geladen is.

De zonnepanelen zijn binnen deze configuratie functioneel en rendabel, doordat de opgewekte energie overdag direct wordt benut door het verbruikssysteem en/of wordt opgeslagen in de batterij. Dit zorgt ervoor dat het aggregaat met name overdag nauwelijks hoeft bij te schakelen. Vooral in perioden met hoge instraling (zoals in de zomer) leidt dit tot een significante reductie in brandstofverbruik en operationele kosten.

De batterij wordt geladen via de zonnepanelen gedurende de dag. Wanneer de laadtoestand van de batterij onder 20% zakt, schakelt het aggregaat automatisch in om de batterij op te laden tot 80%, waarna het aggregaat weer uitschakelt. Deze laadstrategie optimaliseert zowel brandstofgebruik als levensduur van de batterij en waarborgt een stabiele energievoorziening.

De gekozen oplossing blijft desondanks gericht op snelle plaatsing en gecontroleerde inpassing in een drukke stedelijke omgeving, zonder significante verstoring van verkeer of voetgangersstromen.

3.5.4 Barrières in uitvoering

De belangrijkste barrière betreft de fysieke inpassing van de energieopstelling in een beperkte openbare ruimte. Kabelroutes, nooduitgangen en veiligheidszones moeten zorgvuldig worden afgestemd met omgevingsmanagement en gemeentelijke voorschriften.

Daarnaast gelden vaak strikte geluidsrestricties in de avond en nacht. Hoewel het aggregaat slechts als back-up dient, moet worden geborgd dat het geluidsniveau binnen de toegestane normen blijft en het aggregaat niet ingeschakeld wordt in uren met geluidsrestricties.

Tot slot vereisen binnenstedelijke projecten intensieve afstemming met omwonenden en vergunningverleners. Iedere wijziging in plaatsing of gebruik kan leiden tot aanvullende voorwaarden of meldplichten.

3.5.5 Succesfactoren

Een belangrijke succesfactor is het hanteren van een “drop-and-run” inzetconcept, waarbij de energieopstelling snel kan worden geplaatst en direct operationeel is zonder uitgebreide installatiehandelingen.

Duidelijke afstemming met omgevingsmanagement voorafgaand aan plaatsing vermindert risico's op vertraging. Daarnaast draagt een eenduidige

beheerprocedure met remote monitoring bij aan snelle signalering van afwijkingen, zonder dat frequente fysieke inspectie noodzakelijk is.

De combinatie van batterij en zonnepanelen versterkt het duurzame karakter van de bouwplaats en ondersteunt de communicatie richting omwonenden.

3.5.6 Indicatieve bandbreedte kosten per kWh

Voor deze case wordt een indicatieve bandbreedte verwacht van €1,15 tot €1,20 per kWh. De relatief hogere kostprijs per kWh wordt verklaard door:

- Lage totale energieafname
- Hoge logistieke en omgevingskosten
- Beperkte schaalvoordelen

3.5.7 Volgende stappen

Voor verdere uitwerking is het noodzakelijk om de definitieve plaatsingslocatie vast te leggen, inclusief veiligheids- en kabelroutes. Daarnaast dient een integraal veiligheids- en geluidsplan te worden opgesteld in afstemming met de gemeente.

4. Overkoepelende conclusies

Over de vijf cases heen blijkt dat energieoplossingen vooral succesvol zijn wanneer:

1. Het energieprofiel vroegtijdig is vastgesteld voor het juiste inzicht;
2. De fysieke inpassing en logistiek expliciet zijn uitgewerkt;
3. Het beheerproces op de bouwplaats is geborgd met duidelijke rollen en ondersteuning.

Netcongestie vormt in toenemende mate een bepalende randvoorwaarde binnen bouwprojecten. In veel regio's is het verkrijgen van een (tijdelijke) netaansluiting onzeker of gaat dit gepaard met lange doorlooptijden. Hierdoor ontstaat het risico dat projecten vertraging oplopen wanneer energievoorziening afhankelijk blijft van netbeschikbaarheid. In de praktijk betekent dit dat bouwplaatsen zich steeds vaker moeten voorbereiden op (semi-)off-grid oplossingen, zoals de in dit rapport beschreven mobiele energiesystemen.

Daarnaast komt het regelmatig voor dat, ondanks een aangevraagde netaansluiting, de realisatietermijn dusdanig lang is dat projecten genooddaakt zijn om tijdelijk te starten met alternatieve energievoorzieningen. Het tijdig uitwerken van dergelijke scenario's voorkomt stilstand en maakt het mogelijk om flexibel in te spelen op veranderende netbeschikbaarheid.

De analyse bevestigt tevens dat kosten per kWh niet alleen bepaald worden door de prijs van het energiesysteem, maar vooral door de benuttingsgraad (hoeveel kWh daadwerkelijk geleverd wordt per dag/week) en door logistieke en operationele factoren.

This document is for information purposes only. No rights can be derived from its content. ²¹

Dit rapport is opgesteld op basis van beschikbare en geanonimiseerde input. Projectomstandigheden kunnen wijzigen. Aan de inhoud kunnen geen rechten worden ontleend.

This document is for information purposes only. No rights can be derived from
its content. ²²

Signature

TNO Mobility & Built Environment Den Haag, 26 June 2026

ValidSigned door Fieke Beemster
op 14-07-2026

Fieke Beemster
Research manager

ValidSigned door Pim van Mensch
op 14-07-2026

Pim van Mensch
Author

Mobility & Built Environment

Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
www.tno.nl