



Vermogensvraag op de
zero-emissiebouwplaats
van ProRail



Vermogensvraag op de zero-emissiebouwplaats van ProRail

Dit rapport is geschreven door:

Matthijs Otten, Eric Tol, , Roy van den Berg, Paul van de Lande (Amsterdam Consultants)

Delft, CE Delft, juni 2023

Publicatienummer: 23.210457.100

Opdrachtgever: ProRail

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Matthijs Otten (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al meer dan 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
	1.1 Aanleiding	7
	1.2 Vraagstelling	7
	1.3 Afbakening	7
	1.4 Leeswijzer	8
2	Aanpak	9
	2.1 Inleiding	9
	2.2 Casebeschrijving	9
	2.3 Rekenmethode	10
3	Case 1: Bovenbouwvernieuwing Winschoten (Swietelsky)	17
	3.1 Beschrijving project	17
	3.2 Energievraag op de bouwplaats	18
	3.3 Energielevering bij elektrificatie van materieel	20
	3.4 Conclusie	23
4	Case 2: Bovenbouwvernieuwing IJsselmonde (DuraVermeer)	24
	4.1 Beschrijving project	24
	4.2 Energievraag op de bouwplaats	24
	4.3 Energielevering bij elektrificatie van materieel	25
	4.4 Conclusie	28
5	Case 3: Bovenbouwvernieuwing Maasvlakte (DuraVermeer)	29
	5.1 Beschrijving project	29
	5.2 Energievraag	29
	5.3 Energielevering bij elektrificatie van materieel	31
	5.4 Conclusie	34
6	Case 4: Tunnelbouw Hilversum (BAM)	35
	6.1 Beschrijving project	35
	6.2 Energievraag	35
	6.3 Energielevering bij elektrificatie van materieel	37
	6.4 Conclusie	39
7	Case 5: Emplacementsvernieuwing Den Haag (BAM)	41
	7.1 Beschrijving project	41
	7.2 Energievraag op de bouwplaats	41
	7.3 Energielevering bij elektrificatie van materieel	42
	7.4 Conclusie	45



8	Case 6: Regulier onderhoud Zee tot Zevenaar (VolkerRail)	46
	8.1 Beschrijving project	46
	8.2 Energievraag en energielevering op de bouwplaats	46
	8.3 Conclusie	47
9	Aansluitingen bij ProRail	48
10	Conclusies en discussie	49
11	Referenties	52
	Bijlagen	53



Samenvatting

ProRail heeft CE Delft gevraagd aan de hand van een aantal voorbeeldprojecten inzicht te geven in de te verwachten elektrische vermogensvraag op bouwplaatsen die volledig functioneren met batterij-elektrisch materieel. ProRail verkent de mogelijkheden om via het eigen tractienet in de laadbehoefte op de bouwplaatsen te voorzien. Traditionele bouwaansluiting en andere losse aansluitingen zoals bijvoorbeeld voor wisselverwarming kunnen mogelijk ook een rol spelen. Inzicht in de benodigde vermogens is belangrijk om dit goed te kunnen beoordelen.

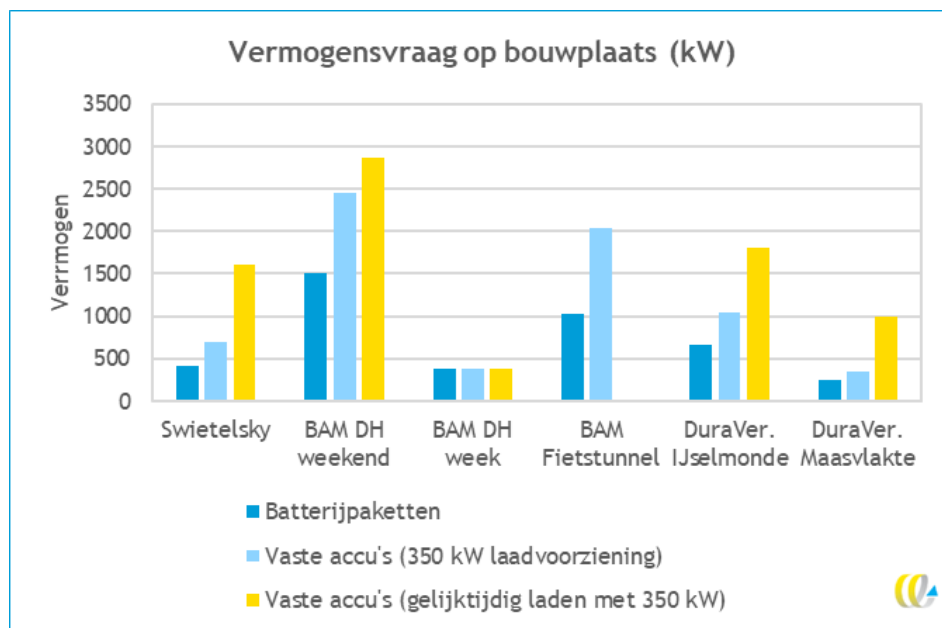
Samen met ProRail zijn zes voorbeeldprojecten (cases) geselecteerd, waarbij vier aannemers zijn betrokken (zie Tabel 1). De projecten zijn representatief voor de brede spreiding van de activiteiten van ProRail. De geselecteerde projecten zijn een mix van spoorwerk en civiele werkzaamheden en een mix van kleinere en grotere projecten, onderhoud en nieuwbouw.

Tabel 1 - Overzicht voorbeeldprojecten

Aannemer	Case	Type project	Duur	Werkzaamheden
Swietelsky	Spoorvernieuwing Winschoten	Bovenbouwvernieuwing, groot materieel	4,5 dag	<ul style="list-style-type: none"> – vernieuwen spoor (in totaal circa 2,5 km); – vernieuwen overweg; – diverse werkzaamheden aan onder andere drainage, asfalt, wisselpuntstuk, schouwpaden.
DuraVermeer	IJsselmonde	Bovenbouwvernieuwing, klein materieel	52 uur	<ul style="list-style-type: none"> – twee wissels vernieuwen met een auto-laadkraan en één wissel met een SRW; – stootjuk vernieuwen; – overpad vernieuwen; – 140 m dwarsliggers en ballast vernieuwen.
DuraVermeer	Maasvlakte	Bovenbouwvernieuwing, klein materieel	36 uur	<ul style="list-style-type: none"> – spoorstaafvernieuwing over circa 560 m; – overwegvernieuwing Strail 9,6 meter, inclusief spoortak 20 m.
BAM	Tunnel Hilversum	Civiel	8 maanden	<ul style="list-style-type: none"> – grondwerk; – tunnelbak inschuiven; – verharding.
BAM	Emplacement Den Haag	Samengesteld spoorwerk	18 weken (van totaal circa 3 jaar)	<ul style="list-style-type: none"> – renovatie sporen; – heraanleg sporen 11 en 12; – sanering wissels; – aanpassen perrons.
VolkerRail	Langs Betuweroute	Liggingsonderhoud	4-6 uur	<ul style="list-style-type: none"> – variërend.

Figuur 1 geeft een overzicht van de vermogensvraag voor middelgroot- en groot materieel voor de verschillende projecten en verschillende laadscenario's.

Figuur 1 - Vermogensbehoefte middelgroot- en groot materieel per project en laadstrategie



De vermogensvraag varieert tussen 170 kW voor regulier onderhoud tot 2.860 kW voor de emplacementsvernieuwing wanneer werktuigen met vaste accu's gelijktijdig in laadpauzes worden opgeladen. Er zijn vanuit ProRail in principe mogelijkheden om deze hoge vermogens op de bouwplaats aan te bieden, via onderstations, het 10 kV-net of via de bovenleiding met behulp van een pantograaf. Het hangt voornamelijk van de locatie af in hoeverre de opties daadwerkelijk mogelijk zijn. Normale bouwaansluitingen of facilitaire aansluitingen zullen vaak een te laag vermogen hebben.

De resultaten laten zien dat de vermogensvraag op de bouwplaats beperkt kan worden door het gebruik van wisselbatterijen. Daarnaast is de factor *tijd* van groot belang. Wanneer er meer tijd is om bij te laden in het project, dan zal de vermogensvraag ook afnemen. Projecten van 4-6 uur gedurende de nacht, waarbij overdag bijgeladen kan worden, hebben een lage vermogensvraag. Bovenbouwvernieuwingen die typisch in 52 uur duren gedurende het weekend en waarbij veel materieel continu wordt ingezet, hebben een veel hogere vermogensvraag.

Het bijladen van werktuigen betekent dat werktijd verloren gaat en dat het materieel gedurende een langere periode ingezet moet worden. De laadtijd is 2-10% ten opzichte van de normale werktijd wanneer wordt gewerkt met wisselaccu's, en kan oplopen van 8-42% in het geval van vaste accu's, die met 350 kW worden bijgeladen.

De extra laadtijd kan worden beperkt indien met hoger vermogen kan worden geladen. Wisselbatterijen hebben het voordeel dat de vermogensvraag en de laadtijd beperkt blijven, maar brengen mogelijk wel extra kosten en extra handelingen met zich mee.

Voor zeer groot materieel, zoals werktreinen, kunnen batterijcontainers van 1 of 2 MWh capaciteit mogelijk een oplossing bieden, met name als de werktijd beperkt blijft tot 5 uur, zoals in onderhoudsprojecten gedurende de nacht. Deze batterijcontainers kunnen elders opgeladen worden of op de bouwplaats. In het laatste geval kan de vermogensbehoefte op de bouwplaats behoorlijk toenemen.

Wanneer voor het materieel laadvoorzieningen worden gerealiseerd, zijn deze uitgelijnd op de piekvraag. Dit betekent dat niet op alle momenten de volledige capaciteit van de aansluiting wordt gebruikt en dat er restcapaciteit is op de aansluiting die niet benut wordt. Uit de analyse blijkt dat de restcapaciteit vaak voldoende is om bouwlogistieke voertuigen te laten laden, mits de laadmomenten goed ingepland worden.

De resultaten geven in een bandbreedte weer hoeveel vermogen er op de bouwplaats nodig is wanneer deze wordt ingericht voor batterij-elektrische werktuigen. Waar mogelijk hebben we in de analyse rekening gehouden met de precieze inzet van werktuigen, maar niet in alle gevallen kon deze inzet precies gegeven worden door de aannemers. Indien werktuigen meer rustmomenten hebben, kan de vermogensvraag mogelijk lager uitkomen dan door ons berekend.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Mobiele werktuigen en aggregaten hebben een substantieel aandeel in de emissies. Zo'n 9% van de CO₂-emissies in transport is afkomstig van mobiele werktuigen, alsmede 8 respectievelijk 12 % van de NO_x- en fijnstofuitstoot.

De transitie naar zero-emissie wordt vanwege de klimaatcrisis met de dag urgenter, waarbij ook de luchtkwaliteit en stikstofproblematiek vragen om snelle en effectieve maatregelen. Vanuit Europa ('Fit for 55'), het Nederlandse Klimaatakkoord en Schone Lucht Akkoord en de stikstofproblematiek worden snelle, daadkrachtige stappen gevraagd. Binnen het programma 'Schoon en Emissieloos Bouwen' werken verschillende partijen, waaronder ook ProRail, samen om de bouwlogistiek zo snel mogelijk te verduurzamen.

ProRail wil meer inzicht krijgen in de rol die zij kan spelen om de bouwplaats te verduurzamen.

1.2 Vraagstelling

ProRail wil inzicht krijgen in de rol die zij kan spelen als opdrachtgever richting aannemers in de transitie naar de zero-emissiebouwplaats. De hoofdvraag van dit onderzoek is:

Hoeveel vermogen aan laadinfrastructuur is er nodig op de zero-emissiebouwplaats, uitgaande van toekomstig (batterij-)elektrisch materieel dat de werkzaamheden uitvoert?

Omdat er verschillende type bouwplaatsen zijn, zal het antwoord hierop variëren van bouwplaats tot bouwplaats. In dit onderzoek kijken we daarom, aan de hand van een aantal voorbeeldprojecten naar verschillende typen bouwplaatsen, die representatief zijn voor de werkzaamheden die ProRail laat uitvoeren.

Naast het type bouwplaats is het benodigde vermogen ook afhankelijk van de laadstrategie. In de voorbeeldprojecten kijken we naar het benodigde vermogen van:

- het laden van materieel met vaste accu's;
- het laden van materieel met wisselaccu's.

Naast het beantwoorden van de hoofdvraag gaan we in dit rapport ook in op de vragen:

- Welke mogelijkheden heeft ProRail om in de vermogensvraag te voorzien?
- Hoeveel tijd is er nodig voor het bijladen van de accu's?

1.3 Afbakening

Materieel

TNO maakt voor het spoo materieel onderscheid naar verschillende grootteklassen materieel, gebaseerd op het motorvermogen (TNO, 2022), zoals weergegeven in Tabel 2. In deze studie ligt de focus op het bepalen van het benodigde vermogen op de bouwplaats om het middelgrote en grote materieel te kunnen laden, indien deze worden voorzien van

een batterij-elektrische aandrijving. Daarnaast wordt meer kwalitatief beschreven wat de mogelijkheden zijn voor het zeer grote materieel. Het kleine en minimaterieel wordt grotendeels buiten beschouwing gelaten.

Ook voor de wegvoertuigen die de bouwplaats aandoen, maken we een kwalitatieve inschatting of er extra vermogen nodig is om deze te laten laden op de bouwplaats, of dat het past op de benodigde aansluiting voor het bouwmaterieel. Het is voor wegvoertuigen een voordeel als ze ook op de bouwplaats kunnen laden, maar het zal over het algemeen ook mogelijk zijn dat ze naar een laadstation in de omgeving rijden om weer bij te laden.

Tabel 2 - Categorieën spoormaterieel

Categorie	Type materieel	Motorvermogen
Zeer groot	Werktreinen en zeer grote specialistische spoorwerktuigen	560-2.000 kW (of hoger bij meerdere motoren)
Groot	Specialistische spoorwerktuigen groot en Rail-wegvoertuigen	130-560 kW
Middelgroot	Specialistische spoorwerktuigen middel	56-130 kW
Klein	Klein materieel	19-56 kW
Mini		< 19 kW

Bron (TNO, 2022).

In de rapportage worden aannames gemaakt over de batterijcapaciteit van de voertuigen. De door ons gegeven batterijcapaciteit is de effectief bruikbare batterijcapaciteit. Daarmee bedoelen we dat batterijen optimaal functioneren in cycli van laden en ontladen tussen de 10-20% als ondergrens en 80-90% als bovengrens van de maximum capaciteit. Binnen deze bandbreedte kan de batterij over het algemeen geladen worden met het vermogen van de lader. De effectieve batterijcapaciteit is daarmee 60-80% van de werkelijke batterijcapaciteit. Om de werkelijke batterijcapaciteit te berekenen, moeten de door ons opgegeven waarden dus met een factor 1,25-1,67 worden vermenigvuldigd, afhankelijk van het type batterij.

1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 beschrijven we eerst de aanpak van dit onderzoek om aan de hand van voorbeeldprojecten (cases) te bepalen wat de vermogensvraag op zero-emissie bouwplaatsen van ProRail wordt. De cases worden kort beschreven en de rekenmethodiek wordt toegelicht. In Hoofdstuk 3-8 wordt voor de cases beschreven welke vermogensvraag we op de bouwplaats verwachten wanneer deze zero-emissie wordt.

In Hoofdstuk 9 beschrijven we kort de verschillende manieren van energielevering door ProRail. Hoofdstuk 10 bevat ten slotte de conclusies.

2 Aanpak

2.1 Inleiding

Om het benodigde laadvermogen voor een zero-emissiebouwplaats op basis van (batterij)-elektrisch materieel te berekenen, zijn zes voorbeeldprojecten (cases) geselecteerd, waarvoor de vermogensvraag is berekend. In Paragraaf 2.2 geven we een overzicht van de verschillende voorbeeldprojecten. In Paragraaf 2.3 beschrijven we hoe we op basis van informatie van de voorbeeldprojecten het benodigde laadvermogen op de bouwplaats hebben berekend.

2.2 Casebeschrijving

In overleg met ProRail is een selectie van voorbeeldprojecten (cases) gemaakt om door te rekenen. De projecten zijn zo gekozen dat ze representatief zijn voor de brede spreiding van de activiteiten van ProRail. De geselecteerde projecten zijn een mix van spoorwerk en civiele werkzaamheden en een mix van kleinere en grotere projecten, onderhoud en nieuwbouw.

Er zijn bij vier verschillende aannemers in totaal zes projecten geselecteerd. Een overzicht van de projecten en de belangrijkste kenmerken zijn weergegeven in Tabel 3. In de Hoofdstukken 3 tot en met 8 worden de projecten uitgebreider beschreven.

Tabel 3 - Overzicht voorbeeldprojecten

Aannemer	Case	Type project	Duur	Werkzaamheden
Swietelsky	Spoorvernieuwing Winschoten	Bovenbouwvernieuwing, groot materieel	4,5 dag	<ul style="list-style-type: none">– vernieuwen spoor (in totaal circa 2,5 km);– vernieuwen overweg;– diverse werkzaamheden aan onder andere drainage, asfalt, wisselpuntstuk, schouwpaden.
DuraVermeer	IJsselmonde	Bovenbouwvernieuwing, klein materieel	52 uur	<ul style="list-style-type: none">– twee wissels vernieuwen met een auto-laadkraan en één wissel met een SRW;– stootjuk vernieuwen;– overpad vernieuwen;– 140 m dwarsliggers en ballast vernieuwen.
DuraVermeer	Maasvlakte	Bovenbouwvernieuwing, klein materieel	36 uur	<ul style="list-style-type: none">– spoorstaafvernieuwing over circa 560 m;– overwegvernieuwing Strail 9,6 m, inclusief spoortak 20 m.
BAM	Tunnel Hilversum	Civiel	8 maanden	<ul style="list-style-type: none">– grondwerk;– tunnelbak inschuiven;– verharding.
BAM	Emplacement Den Haag	Samengesteld spoorwerk	18 weken (van totaal circa 3 jaar)	<ul style="list-style-type: none">– renovatie sporen;– heraanleg sporen 11 en 12;– sanering wissels;– aanpassen perrons.
VolkerRail	Langs Betuwe-route	Liggingsonderhoud	4-6 uur	<ul style="list-style-type: none">– variërend.

2.3 Rekenmethode

2.3.1 Inleiding

De energievraag op de toekomstige zero-emissiebouwplaats wordt veroorzaakt door de laadbehoefte van materieel op de bouwplaats en van voertuigen voor het transport van goederen en personen van en naar de bouwplaats. We maken bij het bepalen van de vermogensvraag bij materieel onderscheid tussen (zeer) groot spoorgebonden materieel, zoals stopwagens, locomotieven en werktreinen, en middelgroot en groot materieel (>56 kW), zoals krollen, shovels en kranen. Klein materieel, zoals handgereedschap, is buiten beschouwing gelaten.

We focussen in onze analyse voor het bepalen van het benodigde vermogen op licht- en middelzwaar materieel, omdat we verwachten dat veel van dit materieel batterij-elektrisch zal worden en bij zal laden op de bouwplaats. Voor het (zeer) grote spoorgebonden materieel zijn de zero-emissieoplossingen nog onzekerder. Mogelijk kunnen ze gebruik maken van bovenleiding of van batterijcontainers. Waterstof als brandstof in een verbrandingsmotor of een brandstofcel is ook een optie. Het transport van- en naar de bouwplaats is ook minder afhankelijk van energievoorziening op de bouwplaats en kan gebruik maken van laadstations onderweg of in de omgeving.¹

In de volgende paragrafen gaan we nader in op de berekening van de te verwachten laadbehoefte van licht- en middelzwaar materieel, zwaar spoorgebonden materieel en transport van en naar de bouwplaats.

2.3.2 Middelgroot en groot materieel

In principe zijn er verschillende manieren van energievoorziening denkbaar voor batterij-elektrisch materieel. Zo is het naast laden op de bouwplaats ook mogelijk om wisselbatterijen of batterijcontainers elders te laden en naar de bouwplaats te vervoeren. Dit levert geen energievraag op de bouwplaats, maar zorgt wel voor extra kosten van batterijen. Afhankelijk van de kosten van energielevering op de bouwplaats, kan dit wel of geen aantrekkelijk alternatief zijn >CE Delft, 2023 #16496<. In deze studie willen we juist inventariseren hoe groot een aansluiting op de bouwplaats moet zijn en daarom laten we deze opties hier buiten beschouwing. Voor middelgroot en groot materieel kijken we naar de vermogensbehoefte, uitgaande van vaste accu's en van wisselaccu's.

Berekening energiegebruik

Voor de voorbeeldprojecten hebben we zoveel mogelijk informatie over de inzet van materieel bij de aannemers opgevraagd. Het betreft de volgende informatie:

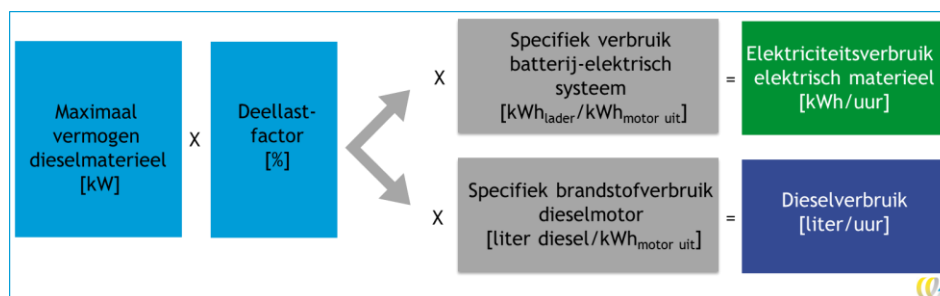
- type materieel en aantal stuks dat wordt ingezet;
- het piekvermogen van het materieel;
- aantal uren inzet gedurende het project;
- aantal draaiuren per dag;
- de deellastfactor bij gemiddeld verbruik (% van piekvermogen dat gemiddeld wordt gebruikt);
- het gemiddelde dieselverbruik per uur.

Op basis van piekvermogen en deellastfactor is het elektriciteitsverbruik per uur berekend, zoals weergegeven in Figuur 2. Ter controle op de deellastfactor is ook het dieselverbruik per uur berekend. Indien dit sterk afwijkt van het opgegeven dieselverbruik, is de deellast-

¹ Ook deze moeten nog verder ontwikkeld worden, met name voor zware voertuigen.

factor (meestal naar beneden) aangepast. Uit onderzoek blijkt dat de deellastfactor van motoren in mobiele werktuigen gemiddeld rond de 30% ligt (TNO, 2021). Het specifiek verbruik van het batterij-elektrisch systeem en het specifiek brandstofverbruik zijn gerelateerd aan het rendement van het motorsysteem. Voor batterij-elektrisch wordt uitgegaan van 81% rendement van laadvoorziening tot geleverde energie door de elektromotor, en daarmee een specifiek verbruik van 1,23 kWh_{lader}/kWh_{motor} (1/0,81 = 1,23). Voor dieselmotoren wordt uitgegaan van een specifiek brandstofverbruik van gemiddeld rond de 0,30 liter diesel/ kWh_{motor}.

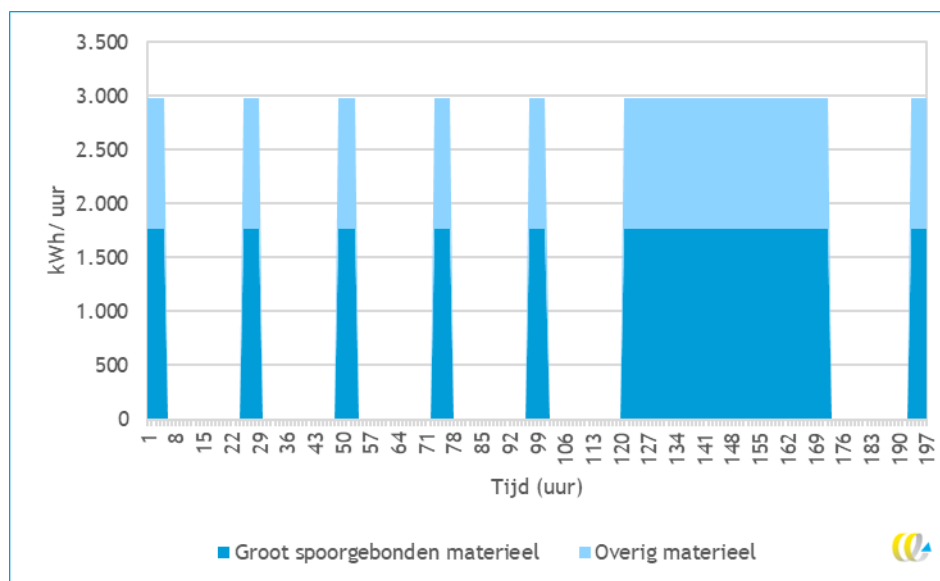
Figuur 2 - Schema berekening energieverbruik



Met het aantal uren inzet per dag en per project hebben we vervolgens het totale elektriciteitsverbruik per dag en per project berekend. Het totale dieselverbruik van het project voor al het materieel samen is ook berekend en is gebruikt om de berekening te valideren met het werkelijk dieselverbruik, indien dit bekend was bij de aannemers.

Op basis van het verbruik per uur en de inzet van materieel gedurende het project, hebben we een profiel opgesteld voor het elektriciteitsverbruik gedurende het project. Figuur 3 geeft het profiel weer voor het voorbeeldproject emplacementsvernieuwing op Den Haag Centraal, met differentiatie naar het grote spoorgebonden materieel en het overige (grote en middelgrote) materieel. Het profiel laat zien wanneer energie wordt verbruikt en wanneer er tijd is om te laden.

Figuur 3 - Energieverbruik gedurende project op Den Haag Centraal



Berekening benodigd vermogen

Het benodigd vermogen hangt af van de hoeveelheid energie die bijgeladen moet worden en de beschikbare tijd. Het vermogen van de laadinfrastructuur geeft de maximale laadsnelheid. Het moment van bijladen en de tijd die nodig is om bij te laden hangt af van de accucapaciteit. Voor de effectief² bruikbare batterijcapaciteit van de werktuigen zijn we uitgegaan van batterijen die 5-7 uur energie kunnen leveren. De capaciteiten variëren van circa 120 kWh voor een minigraver tot 780 kWh voor een 70-ton kraan. In de bijlagen zijn per project de aangenomen batterijcapaciteiten gegeven.

Indien de batterijcapaciteit van materieel voldoende groot is om de energie te kunnen leveren in een aaneengesloten periode, wordt de vermogensvraag (P) voor bijladen berekend door de hoeveelheid energie (E) die benodigd is te delen door de beschikbare tijd (t) om bij te laden (de pauzetijd van het werktuig minus verplaatsingstijd).

$$P = E/t$$

Voor de berekening van het benodigde laadvermogen maakt het in dit geval niet uit of er met wisselaccu's of met vaste accu's wordt gewerkt. In de meeste projecten is echter nauwelijks tijd om bij te laden.³ We gaan er dan van uit dat het werktuig zo snel mogelijk weer van energie moet worden voorzien om weer actief te zijn.

Voor deze situatie zijn op basis van het Energieprofiel drie typen laadscenario's (1, 2a en 2b) doorgerekend op het vermogen dat nodig is op de bouwplaats om het materieel van energie te voorzien:

1. Bijladen van wisselbatterijen op de bouwplaats.
2. Vaste accu's bijladen:
 - a wanneer deze leeg zijn⁴;
 - b gelijktijdig op gesynchroniseerde laadmomenten.

Bijladen van wisselbatterijen op de bouwplaats

We nemen voor dit scenario aan dat elk stuk materieel is voorzien van twee wisselbatterijpakketten. Wanneer het ene batterijpakket in gebruik is, kan het andere worden bijgeladen. Omdat er ook tijd nodig is om de batterij af- en aan te sluiten en naar de wisselplaats te brengen, nemen we aan dat de periode waarin de wisselbatterijen geladen worden, een uur korter is dan de gebruiksduur van het accupakket. In Figuur 4 is dit schematisch weergegeven, met waarden typisch voor een krol, dat dit tot gevolg heeft dat het vermogen waarmee bijgeladen moet worden (50 kW) hoger is dan het gemiddelde verbruik per uur van het materieel (43 kWh/uur). De accuwissel zelf kost ook tijd. De wisselaccu's kunnen in principe met een bestel- of vrachtauto in de buurt van de werktuigen gebracht worden vanaf de plek waar ze opgeladen worden, maar vaak zal de wissel niet kunnen plaatsvinden op de plek waar de werktuigen werken, omdat daar bijvoorbeeld geen ruimte is voor de bestel- of vrachtauto's om langs zij te komen en voor de knijperwagens om de wissel uit te voeren. We nemen aan dat circa 15 minuten nodig zijn om de werktuigen heen en terug te rijden naar een locatie voor de accuwissel (werktuig is dan ook in gebruik) en 15 minuten om de accuwissel uit te voeren⁵.

² De effectief bruikbare accucapaciteit is 60-80% van de totale accucapaciteit

³ Of is er onvoldoende informatie over de rusttijden en gaan we uit van een continu.

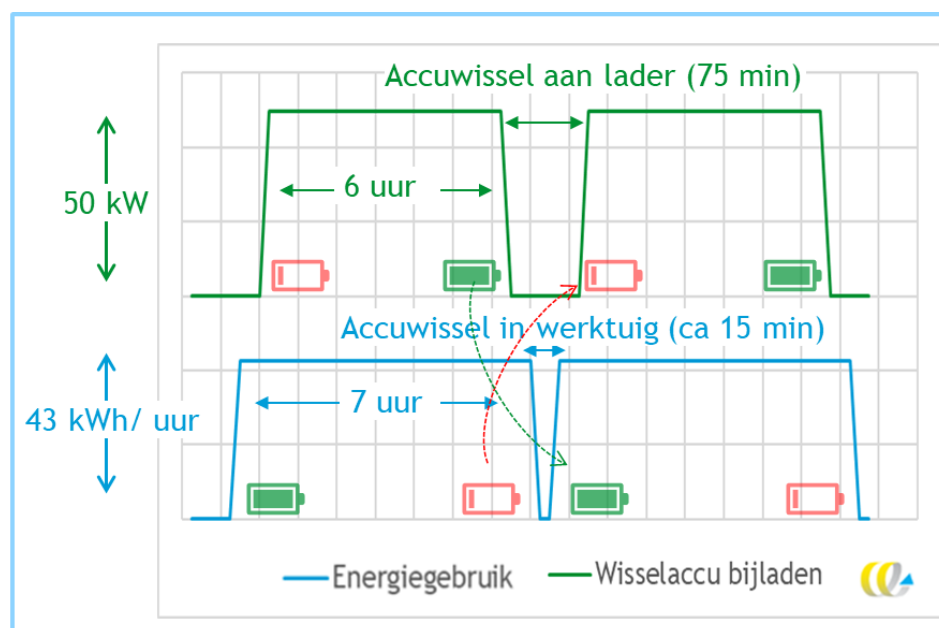
⁴ Dat wil zeggen tot 10 à 20% van totale capaciteit.

⁵ In 15 minuten kan ongeveer 5 kilometer heen terug worden gereden, uitgaande van een gemiddelde snelheid van 20 km/uur. Dit leidt tot extra verbruik. Indien de afstand groter is of de snelheid anders, zal er meer of minder tijd nodig zijn. Aangenomen is dat binnen 2,5 kilometer afstand een geschikte plek kan worden gevonden voor een accuwissel.



Wanneer voor het bijladen van de wisselaccu's bijvoorbeeld 350 kW vermogen nodig is, dan kan gekozen worden voor het snelladen per accu met 350 kW of het langzamer laden van verschillende accu's tegelijk. In het eerste geval kan het aantal benodigde wisselaccu's op de bouwplaats mogelijk worden beperkt. Er kan namelijk doorgewisseld worden (indien machines dezelfde wisselaccu-units gebruiken). In het tweede geval zijn alle accu's continu ofwel in gebruik, ofwel aan het laden.

Figuur 4 - Voorbeeld van laadtijd, gebruikstijd en benodigd laadvermogen voor wisselaccu's in een elektrische krol met effectieve⁶ batterijcapaciteit van 300 kWh en een gemiddeld verbruik van 43 kWh/uur



Vaste accu's bijladen

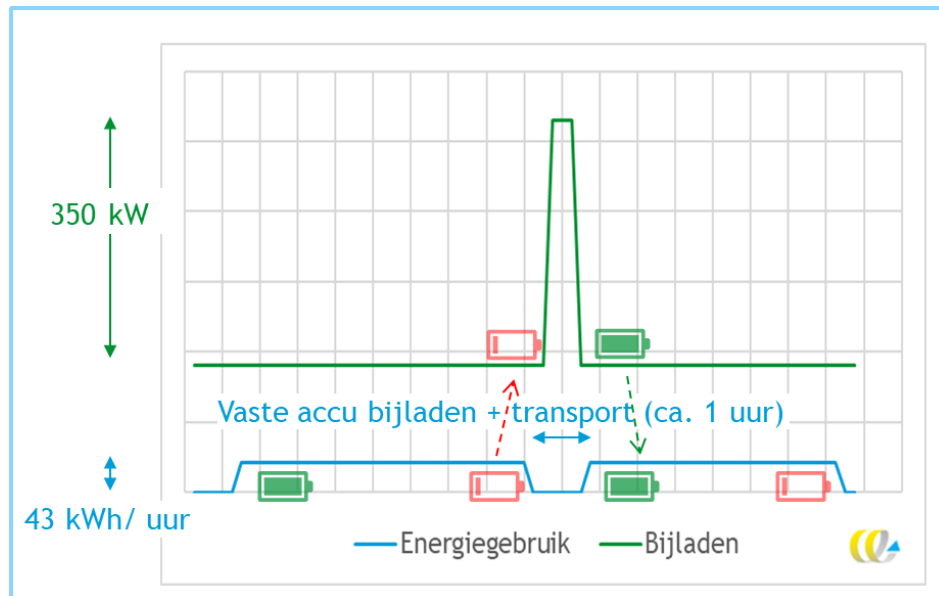
We gaan in dit scenario uit van materieel met een vaste accu. Het bijladen van het werktuig betekent dat het niet ingezet kan worden. Om de laadtijd beperkt te houden gaan we uit van laadinfrastructuur dat een vermogen kan leveren van 350 kW DC, wat op dit moment het hoogste gangbare laadvermogen is voor laders. Dit betekent dat het bijladen van 300 kWh voor een krol ongeveer 50 minuten zal duren (zie

⁶ De effectieve batterijcapaciteit is 60-80% van de totale accucapaciteit.

Figuur 5)⁷. Daarnaast is er tijd nodig om op de laadplaats te komen. We gaan uit van 15 minuten om heen en terug te rijden met het werktuig waarin naar schatting een afstand van ongeveer 2,5 kilometer kan worden overbrugd, heen en terug (5 km totaal).

⁷ Uitgaande dat het bijladen van 10/20% tot 80/90% van de accucapaciteit is.

Figuur 5 - Voorbeeld van laadtijd, gebruikstijd en laadvermogen voor vaste accu in een elektrische krol met effectieve⁸ batterijcapaciteit van 300 kWh en een gemiddeld verbruik van 43 kWh/uur



Voor het bijladen van de vaste accu bekijken we steeds twee varianten:

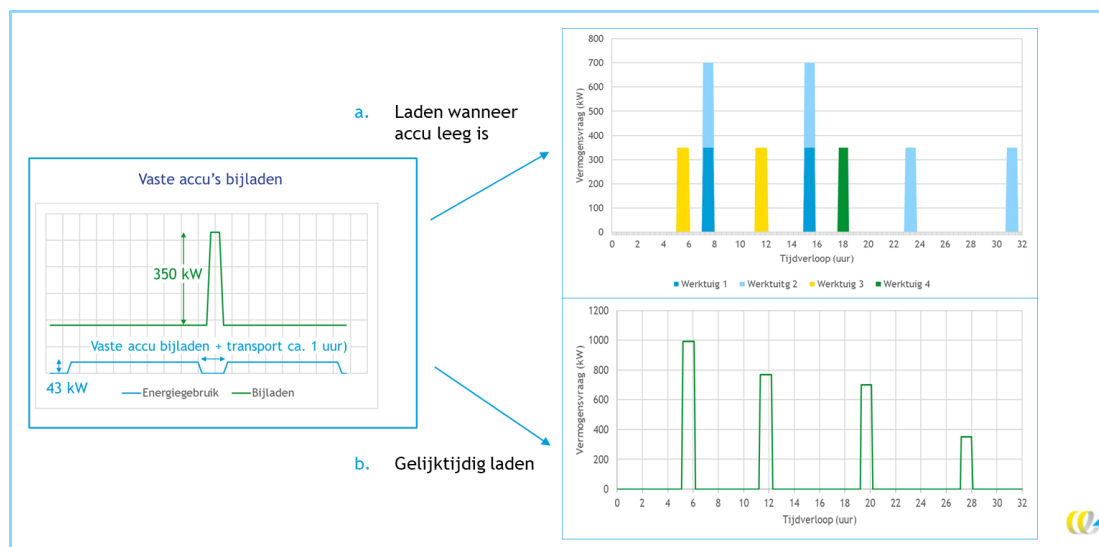
1. Vaste accu's bijladen wanneer deze leeg zijn.
2. Vaste accu's worden alle gelijktijdig bijgeladen op gesynchroniseerde laadmomenten.

Als de accu wordt bijgeladen wanneer deze zo goed als leeg is (10-20% restcapaciteit) dan ontstaat er een spreiding in de momenten waarop de mobiele werktuigen bijgeladen worden. Ze zijn namelijk niet allemaal precies tegelijk leeg. Dit is enerzijds gunstig, omdat dit zorgt voor een spreiding in de vermogensvraag (zie Figuur 6, Variant a). Anderzijds betekent dit dat materieel tijdens het laden niet actief is op de bouwplaats wat mogelijk de effectiviteit van ander materieel beïnvloedt.

In Variant b kijken we daarom wat het effect is wanneer al het materieel gelijktijdig gaat laden als één van de werktuigen een laadbehoefte heeft. De vermogensvraag hoeft dan niet 350 kW per werktuig te zijn. Dit heeft twee redenen. Enerzijds nemen we aan dat de laadtijd van alle voertuigen gelijk is. Dit betekent dat het werktuig met de langste laadtijd bepalend is en het vermogen waarmee de andere werktuigen geladen worden lager kan zijn om binnen de tijden volledig op te laden. Anderzijds zijn niet alle accu's leeg en is dus de laadbehoefte van veel werktuigen kleiner. Figuur 6 - illustreert dit effect aan de hand van de Case 2.

⁸ De effectieve batterijcapaciteit is 60-80% van de totale accucapaciteit.

Figuur 6 - Effect op vermogensvraag wanneer vaste accu's bijladen wanneer leeg of gelijktijdig



2.3.3 Zwaar spoorgebonden materieel

Voor het zwaar spoorgebonden materieel zijn er verschillende mogelijkheden om het materieel zero-emissie te maken. Indien de werkzaamheden het toelaten kan het materieel, indien aanwezig, gebruik maken van de bovenleiding. In veel bouwprojecten wordt echter de bovenleiding buitendienst gesteld en kan van deze op de plek van het bouwproject niet worden gebruikt. Groene waterstof en in de toekomst E-fuels zijn andere mogelijkheden. Maar ook batterij-elektrische aandrijving is een optie. Batterij-elektrische aandrijving kan mogelijk worden gerealiseerd met batterijcontainers (formaat zeecontainer) met een capaciteit van 2 à 3 MWh. Zulke batterijcontainers kunnen mogelijk op een onderstation worden bijgeladen, waar het vermogen 2 MW of hoger is. In de cases geven we aan hoeveel batterijcontainers er mogelijk nodig zijn en hoeveel batterijwissels er eventueel nodig zijn tijdens de werkzaamheden. Een dergelijke wissel is niet eenvoudig omdat de batterijcontainers makkelijk 20-30 ton wegen. De kraanwagen die de batterijcontainers tilt moet op een stabiele ondergrond kunnen staan. Een alternatief is dat de batterijcontainer op de wagon blijft staan en naar een opstelplaats voor materieel rijdt en daar wordt bijgeladen.

2.3.4 Transport van en naar de bouwplaats

Voor de verschillende cases hebben we bij de aannemers informatie over het transport van en naar de bouwplaats opgevraagd. De verkregen informatie bevat over het algemeen het type voertuig, het aantal ritten (N) en de afstand (A). Op basis van verbruikskentallen voor elektrische voertuigen (kWh/km) uit STREAM 2020 (CE Delft, 2021) is de energievraag (E) berekend volgens:

$$E = N \times A \times \text{kwh/km}$$

Daarbij is dus aangenomen dat de energie die verbruikt wordt op weg naar de bouwplaats wordt bijgeladen op de bouwplaats. Bij de cases bespreken we in hoeverre deze energie waarschijnlijk wel of niet op de bouwplaats kan worden geladen.

3 Case 1: Bovenbouwvernieuwing Winschoten (Swietelsky)

3.1 Beschrijving project

Het onderhoud aan de bovenbouw van het spoor bestaat uit het vernieuwen van het ballastbed, het herleggen van het spoor en indien nodig vervangen van de rails en dwarsliggers. Voor dergelijk onderhoud over een langere afstand worden werktreinen ingezet met daarin verschillende gespecialiseerde machines. Voor dit project is in overleg met Swietelsky gekozen voor de spoorvernieuwing in Groningen, tussen Winschoten en Bad Nieuweschans.

Op onderstaande afbeelding zijn de werklocaties weergegeven.

Figuur 7 - Werklocaties



Bron: Swietelsky.

Deze werkzaamheden vinden plaats tijdens een buitendienststelling van 103 uur, van zaterdag 02:00 uur tot woensdag 05:00 uur. De werkzaamheden omvatten de volgende onderdelen:

Winschoten

- vernieuwen spoortak spoor DG (728 m), door middel van SMD80 en RM85 (ombouwtrein en kettinghor);
- toepassen drainage spoor DG;
- vernieuwen overweg Sint Vitusholt (113.6) naar type Strail en Pedestrail met Pedesolar;
- drainage doorspuiten overweg Sint Vitusholt (113.6);
- vernieuwen asfalt rondom overweg Sint Vitusholt (113.6);
- vernieuwen puntstuk wissel 75 en voegloos maken tot de overweg;
- vernieuwen spoortak perronspoor 521, conventioneel vernieuwen;
- vernieuwen spoorstaven in overweg Rondweg en Winschoterzijl (116.6), type Harmelen.

Ulsda (Winschoten - Bad Nieuweschans)

- vernieuwen ballast en dwarsliggers spoor DH (612 m), door middel van SMD80 en RM85 (ombouwtrein en kettinghor);
- vernieuwen schouwpad spoor DH (650 m).

Bad Nieuweschans

- vernieuwen ballast en dwarsliggers spoor DH (470 m) , door middel van SMD80 en RM85 (ombouwtrein en kettinghor);
- vernieuwen spoortak spoor DH (325 m).

Figuur 8 - Ombouwtrein SMD80



Bron: Swietelsky.

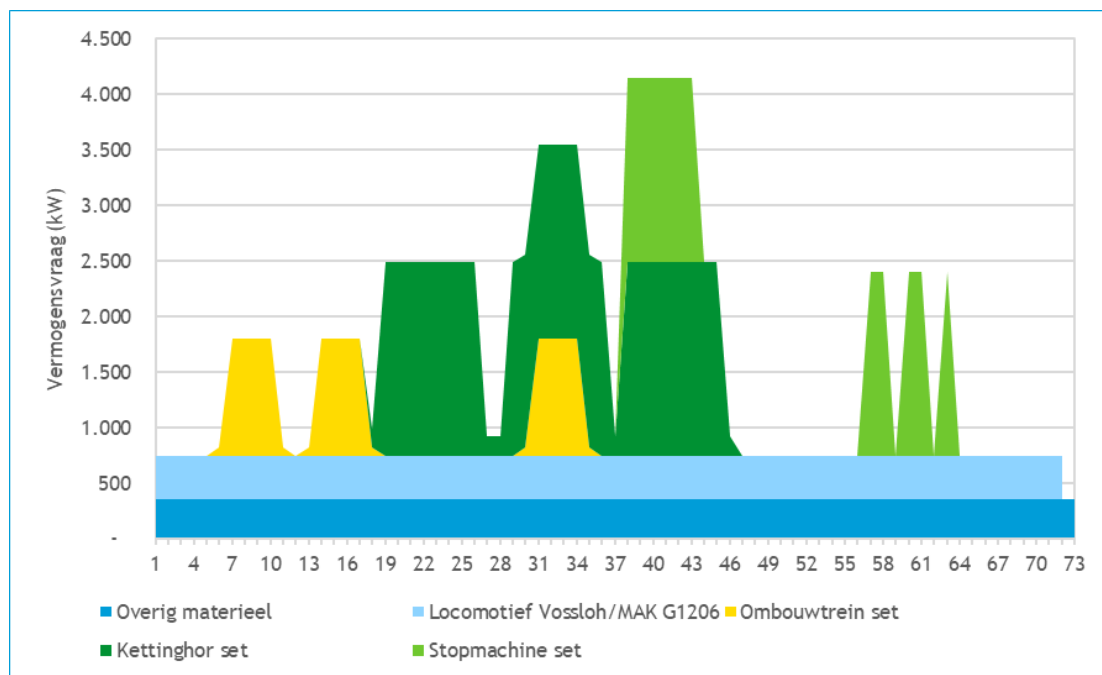
3.2 Energievraag op de bouwplaats

Swietelsky heeft voor dit voorbeeldproject aangegeven welk materieel wordt ingezet tijdens de bovenbouwvernieuwing en hoeveel uren dit materieel wordt ingezet. Daarbij heeft Swietelsky, waar mogelijk, aangegeven op welk moment in het project het materieel actief is. Tabel 17 in de bijlage geeft de energievraag weer van zowel het huidige diesel-materieel als van de toekomstige elektrische variant. De totale hoeveelheid diesel bedraagt 30.644 liter voor al het materieel. Indien elektrisch, wordt een energievraag van 126.490 kWh elektriciteit verwacht. Hiervan komt ruim 100.800 kWh voor rekening van het grote spoorgebonden materieel en 25.600 kWh voor het overige materieel. Voor zowel het zware spoorgebonden materieel als het overige materieel is in Figuur 12 aangegeven wat het energiegebruik is gedurende het project uitgaande van batterij-elektrische aandrijving.

In de eerste 63 uur van het project zijn de verschillende spoorgebonden machinecombinaties actief. Na 40 uur is de totale energievraag 3,8 MWh per uur het hoogst wanneer zowel kettinghorren als stopmachine actief zijn. De twee sets zijn dan echter wel op een andere locatie. Als we naar één locatie kijken, is de maximale vermogensvraag 3,2 MWh per uur.

Naast de spoorgebonden machines zijn er vijf krollen, een shovel en een overslagkraan actief. Deze werken gedurende de periode met gezamenlijk een gemiddelde energievraag van 356 kWh/uur (zie overig materieel in Figuur 9).

Figuur 9 - Energievraag (kWh/uur) van spoorgebonden materieel gedurende project



Ten slotte zal er nog laadvraag ontstaan door de bouwlogistiek van en naar, maar ook op de bouwplaats. Er zijn 84 ritten met vrachtauto's en 30 met bestelauto's van en naar de bouwplaats en 309 korte ritjes met vrachtauto's op de bouwplaats voor het vervoer van dwarsliggers en ballast (zie Tabel 4). Wanneer met batterij-elektrische voertuigen uitgevoerd, bedraagt het totale elektriciteitsverbruik voor deze ritten naar schatting 73.230 kWh (zie Bijlage A.1). Niet al deze energiebehoefte zal op of nabij de bouwplaats zijn, maar ook op de herkomst en bestemmingslocaties van ritten naar en van de bouwplaats. We nemen op basis van de data aan dat de energievraag op of nabij de bouwplaats neerkomt op 40.731 kWh (zie Tabel 4 en Bijlage A.1 voor details). Dit is gebaseerd op de volgende aannames:

- Na elke rit wordt er geladen door de voertuigen die de bouwplaats aandoen. Voor de vrachtauto's die leveren, betekent dit dat de helft van de energievraag van ritten van en naar de bouwplaats op of nabij de bouwplaats zal plaatsvinden. Per rit is dit gemiddeld 336 kWh (zie Bijlage A.2).
- De bestelauto's leggen een afstand van 250 km af en zullen onderweg moeten bijladen. Op de bouwplaats wordt de accu dan volledig bijgeladen. Het betreft dan maximaal 60 kWh per rit.
- De energievraag van vrachtauto's op de bouwplaats staat gelijk aan de totale energievraag van deze voertuigen.

Tabel 4 - Kenmerken en energievraag laden voor logistiek op de bouwplaats

Bouwlogistiek	Aantal ritten	Elektrisch verbruik per (retour) rit (kWh)	Aangenomen effectieve ⁹ batterijcapaciteit (kWh)	Laadvraag per laadsessie voertuig op bouwplaats (kWh)	Laadmomenten op bouwplaats (#)	Energievraag op bouwplaats (kWh)
Vrachtauto's aan en afvoer	84	672	400	336	84	28.228
Bestelauto's aan en afvoer	30	228	60	60	30	1.800
Vrachtauto's op bouwplaats	309	35	400	400	27	10.703
Totaal						40.731

3.3 Energielevering bij elektrificatie van materieel

3.3.1 Middelgroot en groot materieel

Wisselaccu's

Voor het middelgrote en grote materieel (krollen, een shovel en een overslagkraan) geldt dat wanneer deze apparaten worden voorzien van wisselaccu's, een aansluiting van ongeveer 420 kW nabij de bouwplaats voorziet in voldoende capaciteit om de accupakketten op tijd te kunnen laden en te wisselen (zie Tabel 18 in bijlage A.1).

De tijd dat de werktuigen niet gebruikt kunnen worden door de accuwissel is het hoogst voor de overslagkraan en wordt ingeschat op zes uur (12 wissels à 30 minuten per wissel) gedurende de projecttijd van 103 uur.

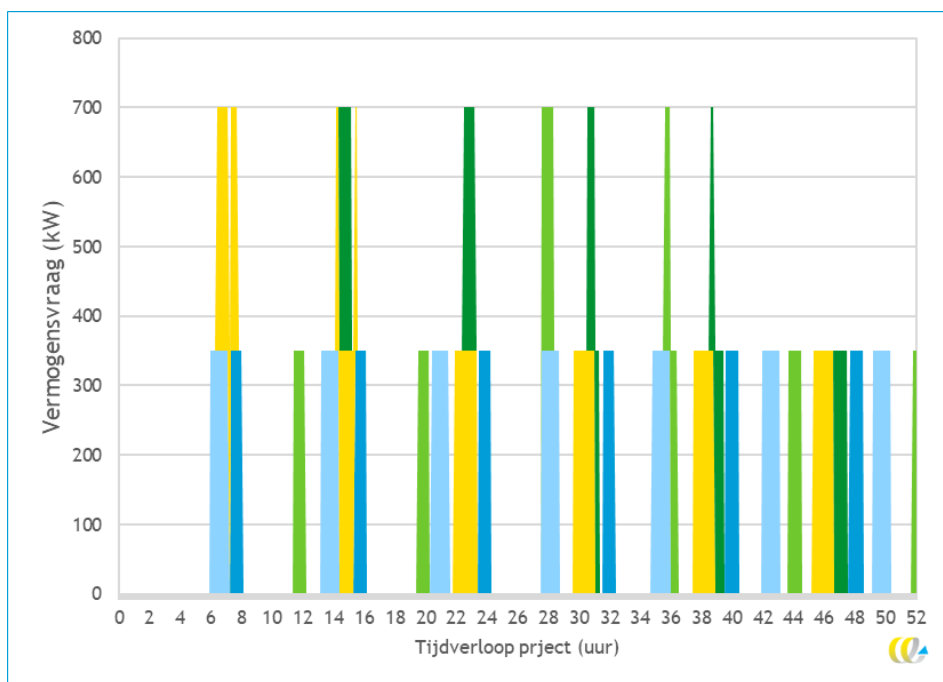
Vaste accu's

Figuur 10 en Figuur 11 geven weer wat de vermogensvraag is om de vaste accu's bij te laden voor de optie wanneer dit wordt gedaan wanneer deze leeg is (Figuur 10) of gelijktijdig (Figuur 11). In het eerste geval zijn er regelmatig twee werktuigen gelijktijdig aan het laden en is de maximale vermogensvraag 700 kW. Twee laadaansluitingen van 350 kW zijn dan voldoende. De laadduur varieert van 51 minuten voor de krol tot 85 minuten voor de overslagkraan. De shovel moet twaalf keer bijladen en heeft de langste totale laadduur van 14 uur gedurende het project van 103 uur. Inclusief tijd om naar het laadstation te rijden schatten we de duur in op 17 uur.

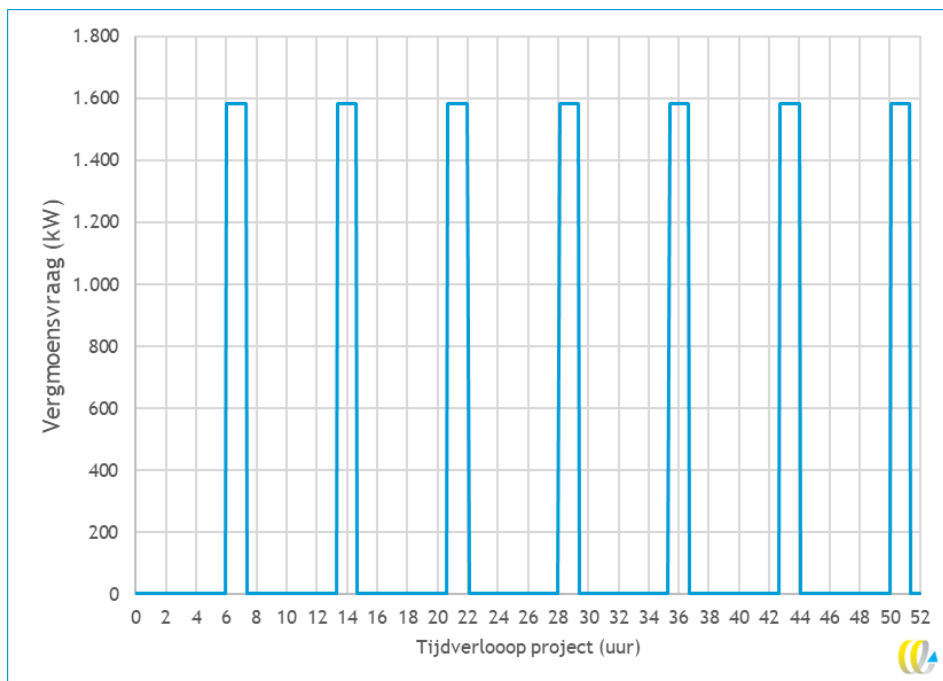
Wanneer het laden synchroon gebeurt, is de eerste laadbeurt na zes uur omdat de shovel dan moet bijladen. In dat geval komt voor al het materieel samen de vermogensvraag uit op 1.600 kW met laadmomenten die 80 minuten duren en waarin in totaal 2.134 kWh wordt bijgeladen. In totaal zijn er gedurende het project twaalf laadmomenten. De langste totale laadduur (voor de overslagkraan) bij 350 kW laden is 16 uur gedurende de project periode van 103 uur. Inclusief tijd om naar het laadstation te rijden schatten we de totale tijd in op 19 uur. De laadtijd kan worden verkort door met een hoger vermogen te laden.

⁹ De effectieve batterijcapaciteit is 60-80% van de totale accucapaciteit.

Figuur 10 - Bijlagen vaste accu's wanneer deze leeg zijn (eerste 52 uur) - de kleuren representeren verschillende werktuigen



Figuur 11 - Vaste accu's gelijktijdig bijladen (eerste 52 uur)



3.3.2 Groot spoorgebonden materieel

Het grote spoorgebonden materieel heeft per machine de hoogste energievraag. Volgens Swietelsky is het voor de kettinghor en de ombouwtrein technisch mogelijk om deze te voorzien van batterijcontainers op extra wagons. Batterijcontainers van 2 MWh zouden hiervoor een optie kunnen bieden. Voor de stopmachine is dat ingewikkelder omdat er geen wagon bijgeplaatst kan worden. Elektrische locomotieven met batterijcontainer op wagons zijn wel mogelijk, maar omdat de locomotief volcontinu werkt is het ingewikkeld om de locomotief van voldoende (28 MWh) energie te voorzien (zie Figuur 9, en Tabel 17 in Bijlage A.1). Ook brengen de extra wagon met batterijcontainers een extra uitdaging qua logistiek (onder andere achteruitrijden). We nemen aan dat voor de stopmachine en locomotief naar andere zero-emissie oplossingen moet worden gezocht.

Van de kettinghor en de ombouwtrein komt de hoogste energievraag in een aaneengesloten periode van een ombouwtrein. Wanneer de benodigde energie voor de ombouwtrein in de eerste twee perioden (twee maal zes uur achtereenvolgend) zou moeten worden geleverd via een batterijpakket, zonder bijladen of batterijwissel, betekent dit dat batterijpakketten met een totale capaciteit van 5,2 MWh nodig is. Voor de kettinghor RM85-750 gaat het om batterijpakketten van 2 à 2,5 MWh. Het batterijpakket van onder andere de ombouwtrein moet na het gebruik van 5,2 MWh nog een keer bijgeladen worden. In totaal is na een eerste inzet van werkzaamheden door de ombouwtreinen nog 3 MWh aan energie nodig voor een tweede inzet. Er is twaalf uur tijd om tussen de eerste en tweede inzet bij te laden. Dit betekent dat met een laadvermogen van 254 kW hiervoor voldoende is. Het bijladen kan mogelijk via een pantograaf vanaf de bovenleiding op een stuk spoor waarvan de bovenleiding nog wel onder spanning staat. Op de bovenleiding moeten dan wel aanpassingen worden gemaakt om te zorgen dat stilstaand geladen kan worden.¹⁰ Directe energielevering via de bovenleiding tijdens de werkzaamheden zou een goedkopere optie zijn, maar zal vanwege veiligheid en regelgeving vaak niet mogelijk zijn.

3.3.3 Bouwlogistiek verkeer

De totale energievraag voor logistiek verkeer die op de bouwplaats is 40.731 kWh (zie Tabel 4). Deze energievraag is hoger dan de 25.600 kWh van het middelgrote en grote materieel. Wanneer voor het materieel met wisselaccu's wordt gewerkt en de aansluiting wordt beperkt tot 420 kW is extra vermogensaansluiting nodig om de logistieke voertuigen van energie te voorzien. Voor de vrachtauto's is 120 uur laadtijd nodig gedurende het 108 uur durende project. Een deel van de laadbehoefte zal ook voor en na het project zijn wanneer ook materiaal wordt aan- en afgevoerd. Uitgaande van laadpalen met 350 kW vermogen zijn er naar verwachting minimaal twee laadpalen nodig voor de vrachtauto's, die dan ca. 50% van de tijd bezet zijn. Voor de bestelauto's voldoet een laadvoorziening van 50 kW.

In het geval de laadstrategie met vaste accu's wordt gekozen, is er al een laadvermogen op de bouwplaats van 700 kW (laden indien accu leeg) of 1.600 kW (synchroon laden). In de situatie dat 700 kW laadvermogen aanwezig is, wordt van de maximaal mogelijke energieafzet in 108 uur (72.800 kWh) slechts 35% gebruikt. In principe kan dan op de momenten dat de werktuigen niet laden de vrachtauto's kunnen bijladen. Dit vraagt echter om een optimale planning en bezetting van de laadvoorziening (91%). Een extra aansluiting van 350 kW lijkt in dit geval minimaal nodig. Met 1.600 kW aansluiting op de bouwplaats is er voldoende capaciteit om de logistieke voertuigen ook te laten laden en is er geen extra capaciteit nodig.

¹⁰ Indien stilstaand geladen wordt, kan de bovenleiding gaan smelten. Deze dient dus verstevigd te worden.

Tabel 5 - Laadbehoefte bouwlogistieke voertuigen

Bouwlogistiek	Energievraag op bouwplaats (kWh)	Laadvraag per laadsessie voertuig (kWh)	Laadmomenten op bouwplaats (#)	Laadduur bij 350 kW/50 kW	Totale laadduur (uur)
Vrachtauto's aan en afvoer	28.228	336	84	1,1 (350 kW)	95
Bestelauto's aan en afvoer	1.800	60	30	1,4 (50 kW)	41
Vrachtauto's op bouwplaats	10.703	400	27	1,3 (350 kW)	35
Totaal	40.731				

3.4 Conclusie

Tabel 6 geeft een overzicht van het benodigde vermogen en de mogelijke laadoplossingen voor het project. Ook is voor het middelgrote en grote materieel aangegeven hoeveel extra laadtijd er nodig is voor het materieel dat het langst moet laden tijdens de werkzaamheden.

Tabel 6 - Overzicht vermogensvraag en laadoplossingen

Categorie materieel voertuigen	Benodigd vermogen aansluiting op bouwplaats (kW)	Laadoplossingen	Maximale extra benodigde tijd voor laden/accuwissel materieel
Groot en middelgroot materieel batterij-elektrisch	420 kW	Wisselaccu's	6 uur
	700 kW	Vaste accu's laden indien leeg	19 uur
	1600 kW	Vaste accu's synchroon laden	19 uur
Groot spoorgebonden materieel met batterij-containers	254 kW	Bijladen accucontainers	Nb
Stoptrein en locomotief	-	Nog geen duidelijke oplossing	Nb
Bouwlogistiek	0-700 kW	Extra 350 kW aansluiting nodig voor logistieke voertuigen bij aansluiting tot 700 kW voor materieel. Anders elders laden.	Nb

4 Case 2: Bovenbouwvernieuwing IJsselmonde (DuraVermeer)

4.1 Beschrijving project

Binnen een grote serie spoorvernieuwingen die DuraVermeer in de regio Rijnmond uitvoert valt ook het project IJsselmonde, waar gedurende een buitendienststelling van 52 uur (waarvan 40 uur netto werktijd) de volgende werkzaamheden worden uitgevoerd:

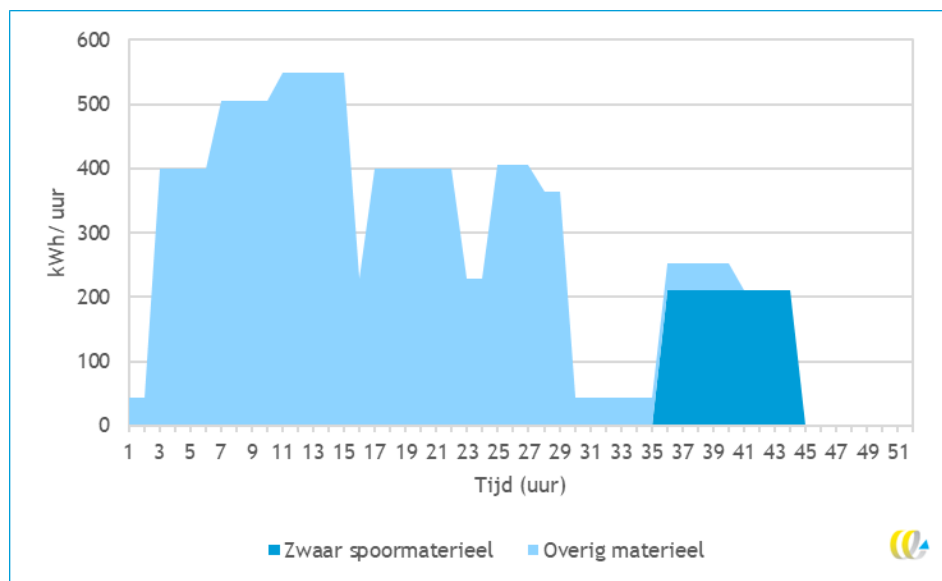
- twee wissels vernieuwen met een autolaadkraan en één wissel met een spookkraan;
- het vernieuwen van een stootjuk;
- een overpad vernieuwen;
- 140 m dwarsliggers en ballast vernieuwen.

4.2 Energievraag op de bouwplaats

DuraVermeer heeft voor dit voorbeeldproject aangegeven welk materieel wordt ingezet tijdens de bovenbouwvernieuwing en hoeveel uren dit materieel wordt ingezet. Daarbij heeft DuraVermeer aangegeven op welk moment in het project het materieel actief is. Tabel 21 in Bijlage B.1 geeft per materieeltype de energievraag weer van het project, zowel voor de huidige variant met diesel aangedreven materieel als van de toekomstige elektrische variant. Voor het project bedraagt de totale hoeveelheid dieselvebruik 3.300 liter voor al het materieel. Indien het materieel elektrisch wordt aangedreven is de totale energievraag 13.080 kWh elektriciteit.

Het materieel wordt gedurende 52 uur ingezet, maar niet al het materieel is continu actief. Figuur 12 geeft de energievraag per uur weer indien al het materieel elektrisch zou zijn, rekening houdend met het moment van inzet per stuk materieel. Het grote spoorgebonden materieel bestaat uit een stopmachine die apart is weergegeven van het overige materieel. De stopmachine heeft een energievraag van 220 kWh per uur als deze actief is. Het overige materieel heeft een totale energievraag van maximaal 550 kWh per uur.

Figuur 12 - Energievraag (kWh/ uur) in weekend van 52 uur



De aanvoer van materiaal voor de werkzaamheden gaat vooral via de weg. De aan- en afvoer van ballast, wissels, dwarsliggers en stootjuk gaat via de weg. Spoorstaven worden met een trein aan- en afgevoerd. Er zijn ook acht verplaatsingen over de weg voor de aan- en afvoer van materieel. In totaal zijn er ongeveer 35 ritten met een trekker-oplegger voor de aan- en afvoer van materiaal en materieel. We nemen aan dat de gemiddelde afstand 200 kilometer per retourrit is (dus in totaal 7.000 kilometers). Daarnaast zijn er naar schatting 21 ritten met personenbusjes om het personeel naar de bouwplaats te brengen, waarbij we ook uitgaan van 200 kilometer retour. De totale energievrage is gelijk aan 2.946 liter diesel of 14.470 kWh elektriciteit wanneer batterij-elektrische voertuigen worden ingezet (zie Tabel 24, Bijlage B.2). De helft van de energievrage (7.235 kWh) zal op of nabij de bouwplaats zijn voor de voertuigen die materiaal, materieel en werknemers hebben afgeleverd. De andere helft zal op de herkomst of vervolg bestemming zijn.

4.3 Energielevering bij elektrificatie van materieel

4.3.1 Middelgroot en groot materieel

Wisselaccu's

Bij de inzet van wisselaccu's kan een aansluiting van ongeveer 667 kW nabij de bouwplaats voorzien in voldoende capaciteit om de accupakketten op tijd te kunnen laden en te wisselen (zie Bijlage B.1).

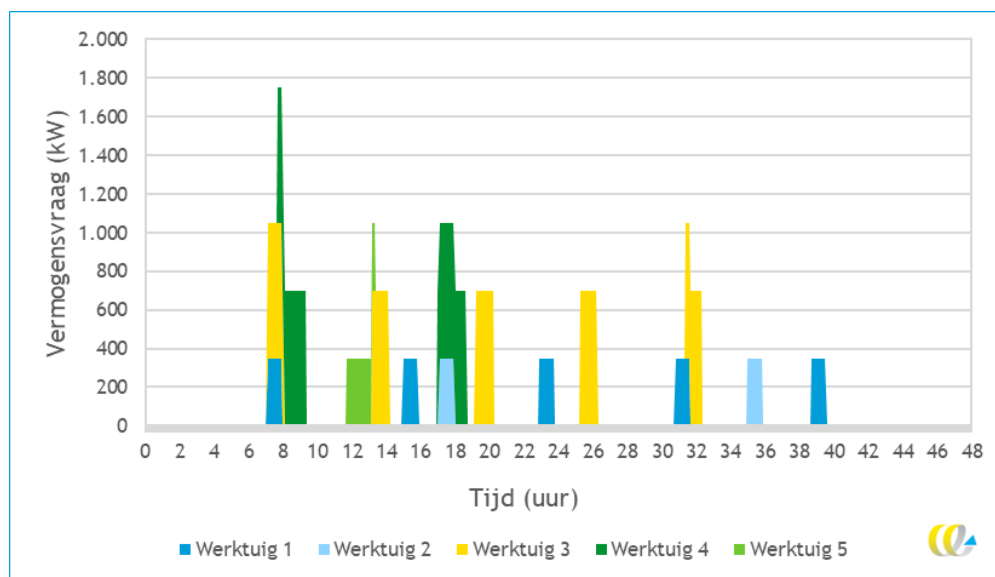
De tijd dat de werktuigen niet gebruikt kunnen worden door de accuwissel is het hoogst voor de shovel en wordt ingeschat op 2,5 uur (vijf wissels à 30 minuten per wissel) gedurende de projecttijd van 52 uur.

Bijladen met vaste batterijen in de werktuigen

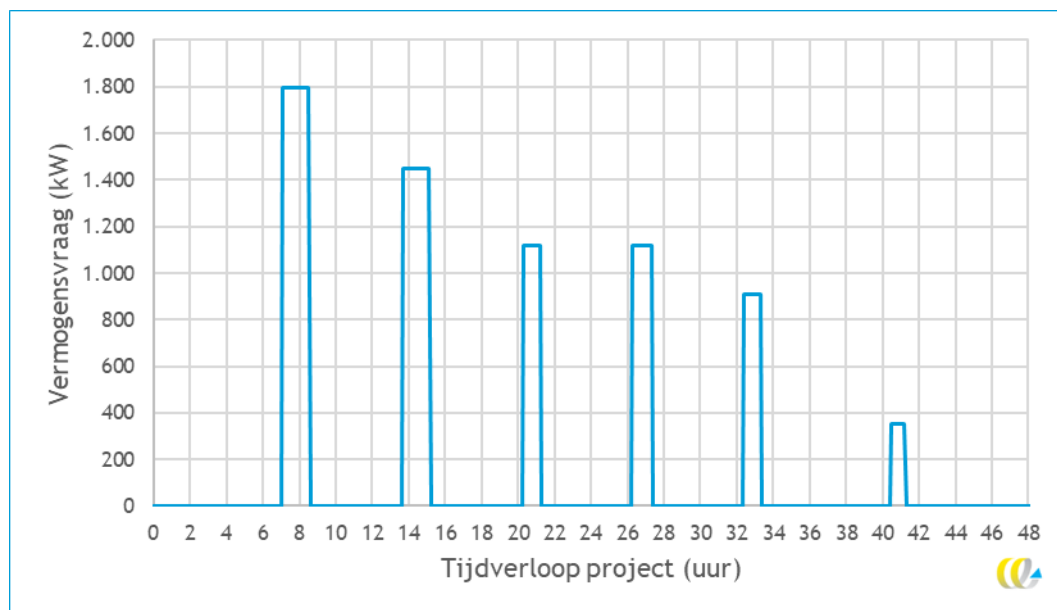
Figuur 13 en Figuur 15 geven weer wat de vermogensvraag is om de vaste accu's bij te laden voor de optie wanneer dit wordt gedaan wanneer deze leeg is (Figuur 13) of gelijktijdig (Figuur 15). In het eerste geval zijn er verschillende malen drie voertuigen tegelijk aan het laden en een enkele keer vier. Door iets slimmer te plannen kan het aantal werktuigen dat tegelijk laadt waarschijnlijk eenvoudig worden beperkt tot drie of zelfs twee. Het totale benodigde vermogen is dan 700 (2 x 350 kW) of 1.050 kW (3x 350 kW). De laadduur varieert van 51 minuten voor een krol tot 102 minuten voor een dumper. De shovel moet vijf keer bijladen en heeft de langste totale laadduur van 5,1 uur gedurende het project van 52 uur. Inclusief tijd om naar het laadstation te rijden schatten we de duur in op 6,25 uur.

Wanneer het laden synchroon gebeurt, is de eerste laadbeurt na zeven uur omdat de shovel dan moet bijladen. In dat geval komt voor al het materieel samen de vermogensvraag uit op 1.798 kW met laadmomenten die in eerste instantie 92 minuten duren en waarin in totaal 2.736 kWh wordt bijgeladen. In een later stadium van het project is alleen nog een krol actief en hoeft alleen deze nog te worden bijgeladen. In totaal zijn er gedurende het project zes laadmomenten. De langste totale laadduur is 6,9 uur voor een krol, die zes keer laadt gedurende het project van 52 uur. Inclusief tijd om naar het laadstation te rijden schatten we de totale tijd in op 8,4 uur. De laadtijd kan worden verkort door met een hoger vermogen te laden.

Figuur 13 - Laadprofiel materieel indien wordt geladen als batterij leeg is



Figuur 14 - Vaste accu's gelijktijdig bijladen



4.3.2 Groot sporgebondenmaterieel

Van al het materieel heeft de stopmachine, op de shovel na, de hoogste energievraag. Gedurende één aaneengesloten periode van acht uur is de energievraag van een elektrische stopmachine in totaal 1.890 kWh. Een batterij(container) van 2 MWh zou hiervoor een optie kunnen bieden, maar voor stopmachines die een dergelijke batterij capaciteit kunnen meedragen moeten nog ontwikkeld worden. Directe energielevering via de bovenleiding zou een goedkopere optie zijn, mits het veilig mogelijk is de bovenleiding tijdens de werkzaamheden onder spanning te houden. Mogelijk kunnen de werkzaamheden zo worden ingedeeld dat dit mogelijk is.

Uitgaande van batterijen met 2 MWh capaciteit, hoeft er in een weekend van 52 uur geen batterijwissel plaats te vinden voor de stopmachine. De batterijen kunnen op een externe locatie geladen worden, maar mogelijk kunnen de batterijen ook via onderstations of bovenleiding van naburige sporen worden geladen in de nacht en hoeven ze niet van de stopmachine afgehaald te worden. De stopmachine wordt ingezet na 24 uur in het project. Een aansluiting van 80 kW zou voldoende zijn om vanaf het begin van het project de batterij(container) langzaam te vullen.

4.3.3 Bouwlogistiek verkeer

De totale energievraag voor logistiek verkeer die op de bouwplaats is 7.235 kWh (zie Tabel 8) en is vergelijkbaar met de energievraag van het grote en middelgrote materieel (11.401 kWh). Wanneer voor het materieel met wisselaccu's wordt gewerkt kan voor het laden van de wisselbatterijen worden volstaan met een aansluiting van 667 kWh. Van de 34.684 kWh laadcapaciteit (52 x 667 kWh) in 52 uur wordt dan 33% benut voor het laden van wisselbatterijen voor het materieel. Dit betekent dat er theoretisch nog ruimte is om tussendoor de vrachtauto's en bestelauto's te laden. Voor de vrachtauto's is achttien uur laadtijd nodig voor de bestelauto's zeventien uur, uitgaande van 50 kW laadvermogen. In het geval de laadstrategie met vaste accu's is er zeker voldoende capaciteit om bij te laden.

Tabel 7 - Laadbehoefte bouwlogistieke voertuigen

Bouwlogistiek	Energievraag op bouwplaats (kWh)	Gemiddelde laadvraag per laadsessie voertuig (kWh)	Laadmomenten op bouwplaats (#)	Laadduur bij 350 kW/50 kW	Totale laadduur (uur)
Vrachtauto's aan en afvoer	6.385	182 (168-336)	35	0,5 (350 kW)	18
Bestelauto's aan en afvoer	850	41	21	0,8 (50 kW)	17
Totaal	7.235				

4.4 Conclusie

Tabel 8 geeft een overzicht van het benodigde vermogen en de mogelijke laadoplossingen voor het project. Ook is voor het middelgrote en grote materieel aangegeven hoeveel extra laadtijd er nodig is voor het materieel dat het langst moet laden tijdens de werkzaamheden.

Tabel 8 - Overzicht vermogensvraag en laadoplossingen

Categorie materieel voertuigen	Benodigd vermogen aansluiting op bouwplaats (kW)	Laadoplossingen	Maximale extra benodigde tijd voor laden/ accuwissel materieel
Groot en middelgroot materieel batterij-elektrisch	667 kW	Wisselaccu's	2,5 uur
	700-1.050 kW	Vaste accu's laden indien leeg	6,25 uur
	1.800 kW	Vaste accu's synchroon laden	8,4 uur
Groot spoorgebonden materieel met batterijcontainers	80 kW	Bijladen accucontainers	-
Bouwlogistiek	0 kW (extra)	Restcapaciteit materieel kan worden ingezet	Nb

5 Case 3: Bovenbouwvernieuwing Maasvlakte (DuraVermeer)

5.1 Beschrijving project

In dit project wordt de bovenbouw van een spoorgedeelte op de Maasvlakte vernieuwd over een lengte van 560 meter dubbelspoor. Het werk gebeurt tijdens een 36-uur durende buitendienststelling, waarbinnen gedurende 30 effectief gewerkt wordt. Er zijn twee bouwplekken (putten), De ene put is ongeveer 16 uur bezig met 560 m spoorstaafvernieuwing, de tweede put is 30 uur bezig met de vernieuwing van een strail-overweg (9,6 meter, incl. 20 m spoortak).

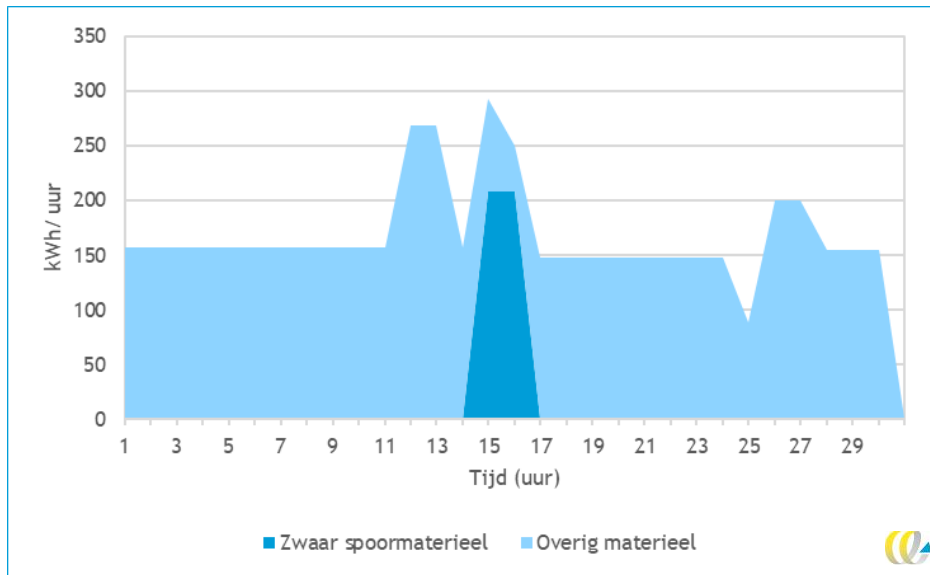
Het plaatsen van een overweg omvat de volgende werkzaamheden: spoor losmaken, optillen, ballast weghalen en terugplaatsen, overwegplaten leggen, spoor terugleggen, asfalt leggen. Het is relatief weinig machinaal werk, maar veel hand-(mensen-)werk.

5.2 Energievraag

DuraVermeer heeft voor dit voorbeeldproject aangegeven welk materieel wordt ingezet tijdens de bovenbouwvernieuwing en hoeveel uren dit materieel wordt ingezet. Daarbij heeft DuraVermeer aangegeven op welk moment in het project het materieel actief is. Tabel 25 in Bijlage C.1 geeft per materieeltype de energievraag weer van het project zowel voor de huidige variant met diesel aangedreven materieel als van de toekomstige elektrische variant. Voor het project bedraagt de totale hoeveelheid diesilverbruik 1.484 liter voor al het materieel. Indien het materieel elektrisch wordt aangedreven is de totale energievraag 6.013 kWh elektriciteit. Het materieel wordt gedurende 36 uur ingezet, maar niet al het materieel is continu actief.

Figuur 15 geeft de energievraag per uur weer indien al het materieel elektrisch zou zijn, rekening houdend met het moment van inzet per stuk materieel. Het grote spoorgebonden-materieel bestaat uit een stopmachine die apart is weergegeven van het overige materieel. De stopmachine heeft een energievraag van 207 kWh per uur als deze actief is. Het overige materieel heeft een totale energievraag van maximaal 267 kWh per uur.

Figuur 15 - Energievraag (kWh/ uur) in 30 uur



De aanvoer van materiaal voor de werkzaamheden gaat vooral via de weg. De aan- en afvoer van ballast, dwarsliggers en asfalt gaat via de weg. Spoorstaven worden met een trein aan- en afgevoerd. Er zijn ook zes verplaatsingen over de weg voor de aan- en afvoer van materieel. In totaal zijn er ongeveer elf ritten met een trekker-oplegger voor de aan- en afvoer van materiaal en materieel. We nemen aan dat de gemiddelde afstand 200 kilometer per retourrit is (dus in totaal 2.200 kilometers). Daarnaast zijn er naar schatting 30 ritten met personenbusjes om het personeel naar de bouwplaats te brengen, waarbij we ook uitgaan van 200 kilometer retour. De totale energievrage is gelijk aan 1.309 liter diesel of 6.125 kWh elektriciteit wanneer batterij-elektrische voertuigen worden ingezet (zie Tabel 28, Bijlage C.2B.2). De helft van ze energievrage (3.063 kWh) zal op of nabij de bouwplaats zijn voor de voertuigen die materiaal, materieel en werknemers hebben afgeleverd. De andere helft zal op de herkomst of vervolg bestemming zijn.

5.3 Energielevering bij elektrificatie van materieel

5.3.1 Middelgroot en groot materieel

Wisselaccu's

Bij de inzet van wisselaccu's kan een aansluiting van ongeveer 242 kW nabij de bouwplaats voorzien in voldoende capaciteit om de accupakketten op tijd te kunnen laden en te wisselen (zie Bijlage C.1).

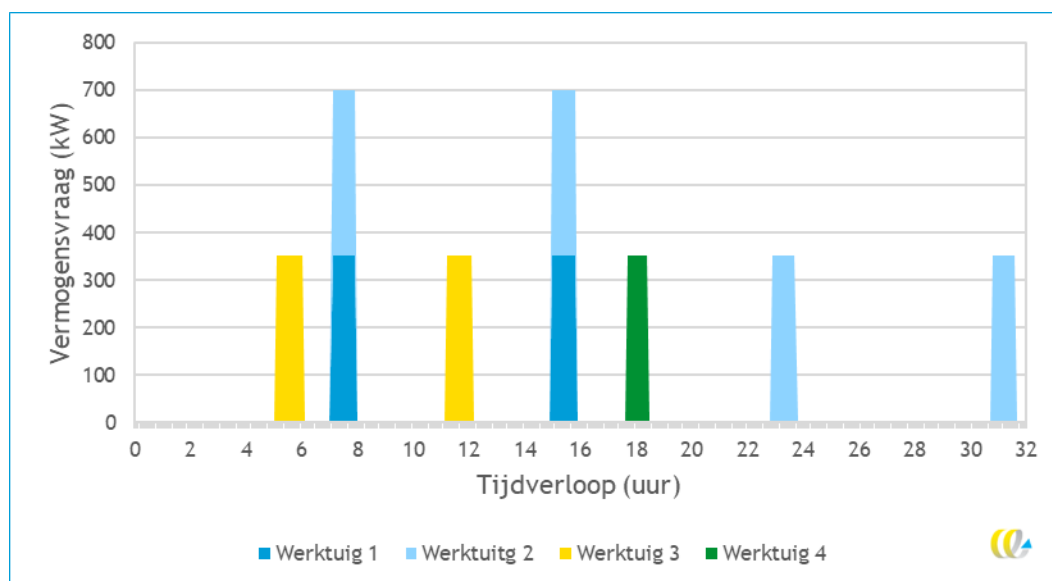
De tijd dat de werktuigen niet gebruikt kunnen worden door de accuwissel is het hoogst voor een krol en wordt ingeschat op twee uur (vier wissels à 30 minuten per wissel) gedurende de projecttijd van 30 uur.

Bijladen met vaste batterijen in de werktuigen

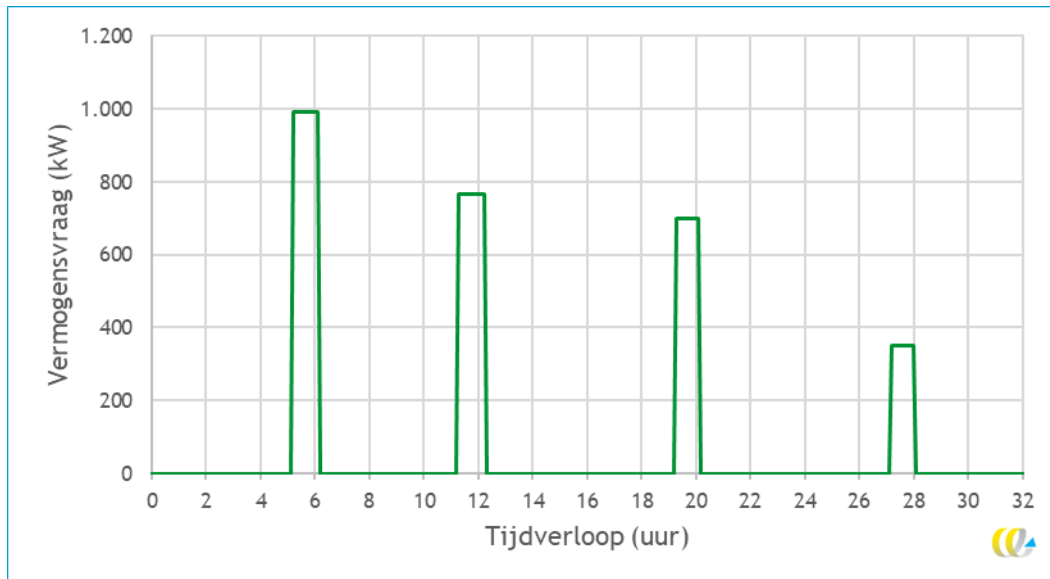
Figuur 16 en Figuur 17 geven weer wat de vermogensvraag is om de vaste accu's bij te laden voor de optie wanneer dit wordt gedaan wanneer deze leeg is (Figuur 16) of gelijktijdig (Figuur 17). In het eerste geval zijn er verschillende malen twee voertuigen tegelijk aan het laden. Door iets slimmer te plannen kan het aantal werktuigen dat tegelijk laadt waarschijnlijk eenvoudig worden beperkt tot één. Het totale benodigde vermogen is dan 350 of 700 kW (2 x 350 kW). De laadduur varieert van 51 minuten voor een krol tot 62 minuten voor een shovel. De krol moet vier keer bijladen en heeft de langste totale laadduur van 3,4 uur gedurende het project van 30 uur. Inclusief tijd om naar het laadstation te rijden schatten we de duur in op 4,4 uur.

Wanneer het laden synchroon gebeurt, is de eerste laadbeurt na vijf uur omdat de shovel dan moet bijladen. In dat geval komt voor al het materieel samen de vermogensvraag uit op 990 kW met laadmomenten die in eerste instantie 62 minuten duren en waarin in totaal 1.018 kWh wordt bijgeladen. In een later stadium van het project is alleen nog een krol actief en hoeft alleen deze nog te worden bijgeladen. In totaal zijn er gedurende het project vier laadmomenten. De langste totale laadduur is 3,4 uur voor een krol, die vier keer laadt gedurende het project van 30 uur. Inclusief tijd om naar het laadstation te rijden schatten we de totale tijd in op 4,4 uur. De laadtijd kan worden verkort door met een hoger vermogen te laden.

Figuur 16 - Laadprofiel materieel indien wordt geladen als batterij leeg is



Figuur 17 - Vaste accu's gelijktijdig bijladen



5.3.2 Groot sporgebondenmaterieel

De stopmachine heeft in dit project een beperkte rol. Gedurende één aaneengesloten periode van twee uur is de energievraag van een elektrische stopmachine in totaal 415 kWh. Een kleine batterijcontainers van 0,5 MWh zou hiervoor een optie kunnen bieden, maar mogelijk moet de stopmachine in andere projecten langer worden ingezet en is een grotere batterijcontainer van bijvoorbeeld 1.500 kWh wenselijk. Stopmachines die een dergelijke batterij capaciteit kunnen meedragen moeten nog ontwikkeld worden. Energielevering via de bovenleiding zou een goedkopere optie zijn, mits het veilig mogelijk is de bovenleiding tijdens de werkzaamheden onder spanning te houden. Mogelijk kunnen de werkzaamheden zo worden ingedeeld dat dit mogelijk is.

Uitgaande van een batterij met 0,5 MWh capaciteit, hoeft er in 30 uur tijd geen batterijwissel plaats te vinden voor de stopmachine. De batterij kan op een externe locatie geladen worden, maar mogelijk kan de batterij ook via onderstations of bovenleiding van naburige sporen worden geladen in de nacht en hoeven ze niet van de stopmachine afgehaald te worden. De stopmachine wordt ingezet na vijftien uur in het project. Een aansluiting van 28 kW zou voldoende zijn om vanaf het begin van het project de batterijcontainer langzaam te vullen tot 415 kWh.

5.3.3 Bouwlogistiek verkeer

De totale energievraag voor logistiek verkeer die op de bouwplaats is 3.062 kWh (zie Tabel 9) en is ongeveer de helft van de energievraag van het grote en middelgrote materieel (5.598 kWh). Wanneer voor het materieel met wisselaccu's wordt gewerkt kan voor het laden van de wisselbatterijen worden volstaan met een aansluiting van 242 kWh. Van de 7.253 kWh laadcapaciteit (30 x 242 kWh) in 30 uur wordt dan 77% benut voor het laden van wisselbatterijen voor het materieel. Dit betekent dat er weinig ruimte is om tussendoor de vrachtauto's en bestelauto's te laden. Een extra laadpaal van 350 kW is dan zeer wenselijk. Voor de vrachtauto's is ruim vijf uur laadtijd nodig bij 350 kW en voor de bestelauto's elf uur tijd, uitgaande van 50 kW laadvermogen.

In het geval bij de laadstrategie met vaste accu's voor 2x 350 kW wordt gekozen, is er voldoende capaciteit om bij te laden.

Tabel 9 - Laadbehoefte bouwlogistieke voertuigen

Bouwlogistiek	Energievraag op bouwplaats (kWh)	Gemiddelde laadvraag per laadsessie voertuig (kWh)	Laadmomenten op bouwplaats (#)	Laadduur bij 350 kW/50 kW	Totale laadduur (uur)
Vrachtauto's aan- en afvoer	1.848	168	11	0,5 (350 kW)	5,3
Bestelauto's aan- en afvoer	1.214	40	13	0,8 (50 kW)	10,5
Totaal	3.062				

5.4 Conclusie

Tabel 10 geeft een overzicht van het benodigde vermogen en de mogelijke laadoplossingen voor het project. Ook is voor het middelgrote en grote materieel aangegeven hoeveel extra laadtijd er nodig is voor het materieel dat het langst moet laden tijdens de werkzaamheden.

Tabel 10 - Overzicht vermogensvraag en laadoplossingen

Categorie materieel voertuigen	Benodigd vermogen aansluiting op bouwplaats (kW)	Laadoplossingen	Maximale extra benodigde tijd voor laden/ accuwissel materieel
Groot en middelgroot materieel batterij-elektrisch	242 kW	Wisselaccu's.	2 uur
	350-700 kW	Vaste accu's laden indien leeg.	4,4 uur
	990 kW	Vaste accu's synchroon laden.	4,4 uur
Groot spoorgebonden materieel met batterij-containers	28 kW	Bijladen accucontainers.	-
Bouwlogistiek	0-350 kW extra	Laden als capaciteit over is kan bij minimaal 2x 350 kW voor materieel. Anders elders laden.	-

6 Case 4: Tunnelbouw Hilversum (BAM)

6.1 Beschrijving project

De tunnelbouw is een civiel project waar naast de spoorwerkzaamheden een tunnel wordt gegraven, wordt geboord en beton wordt aangebracht. Het materieel is diverser dan voor alleen spoorwerkzaamheden en betreft onder andere ook een betonpomp en een boorkraan. Het project duurt 26 weken.

6.2 Energievraag

BAM heeft voor dit voorbeeldproject aangegeven welk materieel wordt ingezet tijdens de tunnelbouw. Daarbij is een indicatie gegeven van het aantal uren dat materieel per dag maximaal wordt gebruikt in bepaalde weken van het project.

Tabel 29 in Bijlage D.1 geeft per materieeltype de energievraag weer van het project zowel voor de huidige variant met diesel aangedreven materieel als van de toekomstige elektrische variant. Voor het project bedraagt de totale hoeveelheid diesilverbruik 23.204 liter voor al het materieel. Indien het materieel elektrisch wordt aangedreven is de totale energievraag 94.797 kWh elektriciteit.

Het materieel wordt gedurende zestien weken ingezet, maar niet al het materieel is continu actief. Figuur 1818 geeft de gemiddelde energievraag per dag weer voor de zestien weken, indien al het materieel elektrisch zou zijn. Dit is gebaseerd op het gemiddeld aantal uur per dag dat materieel wordt ingezet in een bepaalde week (zie ook

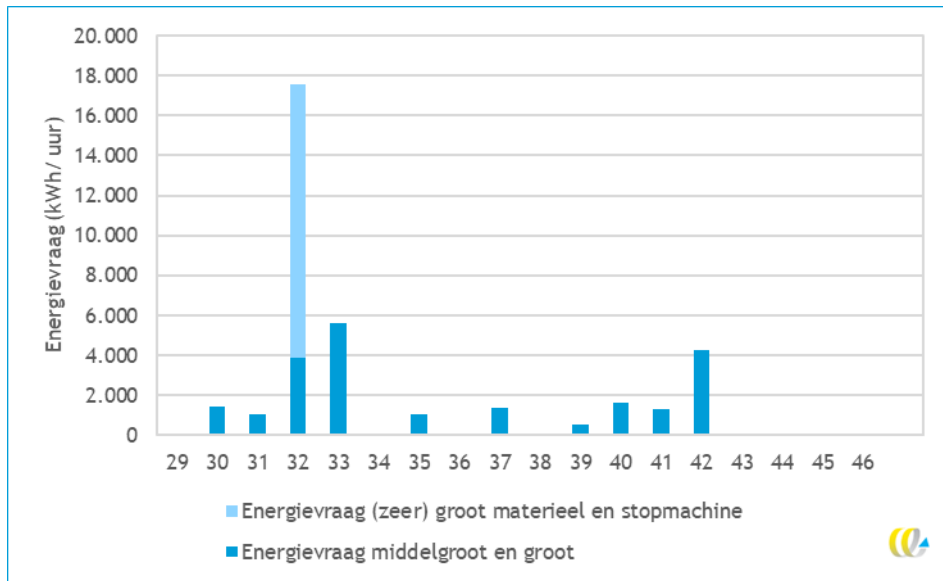
Tabel 30 en

Tabel 31 in Bijlage D.1). Het grote spoorgebonden materieel bestaat uit een stopmachine die samen met ander zwaar materieel (drie kranen) apart is weergegeven van het overige materieel.

Het zware materieel heeft gezamenlijk een energievraag van 13.720 kWh per dag als deze actief is. Het overige materieel heeft een totale energievraag van maximaal 3.871 kWh per dag. De week met de maximale energievraag is week 32. Deze week wordt daarom nader beschouwd. Als er voldoende energievoorziening is in deze week is het er ook in de andere weken.

De aanvoer van materiaal, materieel en personen is voor dit project niet in kaart gebracht.

Figuur 1818 - Gemiddelde energievraag per dag voor de zestien weken



6.3 Energielevering bij elektrificatie van materieel

6.3.1 Middelgroot en groot materieel

Wisselaccu's

Bij de inzet van wisselaccu's kan een aansluiting van ongeveer 481 kW nabij de bouwplaats voorzien in voldoende capaciteit om de accupakketten tijdens het gebruik van een andere wisselaccu op tijd te kunnen laden en te wisselen (zie

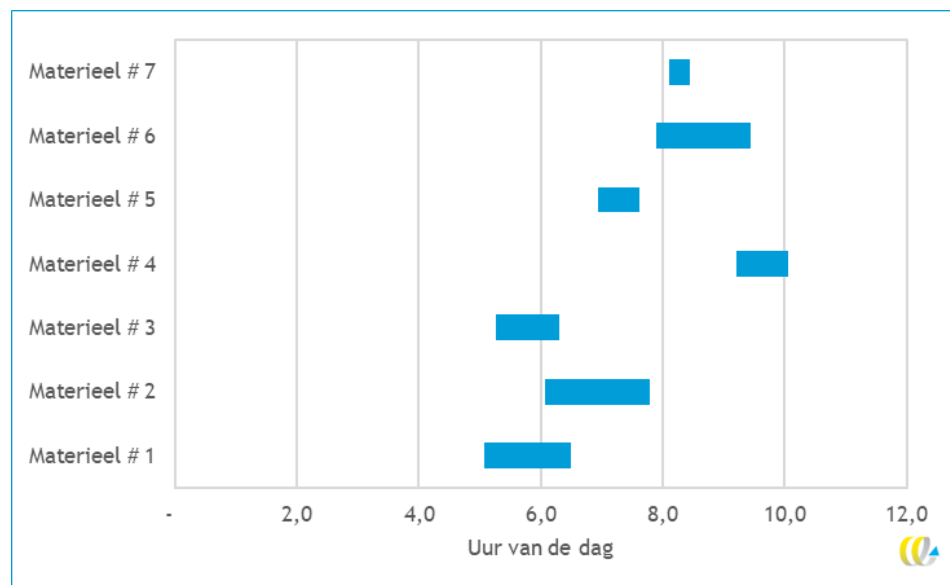
Tabel 32, Bijlage D.1). Een stopmachine, twee telekranen en een boorkraan zijn daarbij buiten beschouwing gelaten (zie zwaar materieel). De tijd dat de werktuigen niet gebruikt kunnen worden door de accuwissel is ingeschat op 0,5 uur per dag (één wissel).

Bijladen met vaste batterijen in de werktuigen

Voor de tunnelbouw hebben we geen precieze gegevens over de inzet van het materieel gedurende de dag. Alleen het aantal uur inzet per dag is bekend. Het materieel moet per dag maximaal één maal bijladen om de werkzaamheden uit te voeren. Figuur 19 geeft weer wat de laadmomenten van het materieel zouden zijn bij 350 kW laden, indien al het materieel gelijktijdig start met de werkzaamheden. De figuur laat zien dat het mogelijk moet zijn om de laadmomenten zo te kiezen dat maximaal twee werktuigen tegelijk laden en dat twee maal 350 kW laadaansluiting in de vermogensbehoefte kan voorzien. De laadduur varieert van 30 minuten tot 89 minuten. Het materieel laadt maximaal één keer op per dag. Inclusief tijd om naar het laadstation te rijden schatten we de totale duur per stuk materieel in op maximaal 2 uur.

Wanneer het laden synchroon gebeurt, kom de vermogensvraag uit op 1475 kW met laadmomenten die 89 minuten duren en waarin in totaal 2.193 kWh wordt bijgeladen. In dit geval is de laadtijd voor al het materieel 89 minuten, inclusief tijd om naar het laadstation te rijden schatten we 2 uur. De laadtijd kan worden verkort door met een hoger vermogen te laden.

Figuur 19 - Laadprofiel materieel indien wordt geladen als batterij leeg is



6.3.2 (zeer) groot materieel

Naast de stopmachine met een energievraag van 2.560 kWh per dag zijn er in dit project drie kranen die een energiebehoefte hebben bij 2.000 tot 5.000 kWh per dag (zie

Tabel 30, Bijlage D.1). Batterijcontainers met een capaciteit van 1.000-2.500 kWh zouden hiervoor een oplossing kunnen bieden. In totaal gaat het om 17.591 kWh energie per dag die nodig is voor deze vier werktuigen. Een vermogen van 1.235 kW is nodig om de batterijcontainers op tijd op te laden voor het volgende gebruik.

De batterijen kunnen op een externe locatie geladen worden, maar mogelijk kunnen de batterijen ook via onderstations of bovenleiding van naburige sporen worden geladen in de nacht en hoeven ze niet van de werktuigen afgehaald te worden.

6.4 Conclusie

Tabel 11 geeft een overzicht van het benodigde vermogen en de mogelijke laadoplossingen voor het project. Ook is voor het middelgrote en grote materieel aangegeven hoeveel extra laadtijd er nodig is voor het materieel dat het langst moet laden tijdens de werkzaamheden.

Tabel 11 Overzicht vermogensvraag en laadoplossingen

Categorie materieel voertuigen	Benodigd vermogen aansluiting op bouwplaats (kW)	Laadoplossingen	Maximale extra benodigde tijd voor laden/ accuwissel materieel
Groot en middelgroot materieel batterij-elektrisch	481 kW	Wisselaccu's.	0,5 uur per dag
	700 kW	Vaste accu's laden indien leeg.	2 uur per dag
	1.475 kW	Vaste accu's synchronoon laden.	2 uur per dag
Groot spoorgebonden materieel met batterijcontainers	1.235 kW	Bijladen accucontainers op bouwplaats. Anders vol aanvoeren.	-
Bouwlogistiek	N.B.	N.B.	N.B.

7 Case 5: Emplacements- vernieuwing Den Haag (BAM)

7.1 Beschrijving project

Het emplacement Den Haag Centraal verbindt de sporen uit Leiden, Gouda en Rotterdam met station Den Haag Centraal. Dit station is een kopstation met twaalf perron-sporen waarvan er nu tien in gebruik zijn. Het project 'Ombouw emplacement Den Haag Centraal' betreft een MIRT-project en dient het emplacement Den Haag voor 2025 geschikt te maken om de PHS-dienstregeling op de corridors naar Leiden en Rotterdam te kunnen rijden. Richting Rotterdam is het gewenst dat in de dienstregeling in 2025 het treinaanbod van twee IC's en vier sprinters groeit naar vier IC's en zes sprinters. Richting Leiden zal de groei van vier IC's en vier sprinters naar zes IC's en zes Sprinters behelzen. Het huidige emplacement is daarvoor ongeschikt.

Het project omvat een groot aantal vernieuwings- en aanpassingswerkzaamheden aan sporen, wissels en perrons, gefaseerd in de drie verschillende richtingen:

- Leiden;
- Gouda;
- Rotterdam.

Het totale project gaat circa drie jaar duren en er zijn twee grote buitendienststellingen gepland. Het type werkzaamheden is divers en omvat spoorbovenbouwvernieuwing, het verwijderen en vernieuwen van wissels, het opnieuw in dienst nemen van de sporen 11 en 12, het verhogen van de perrons en werkzaamheden aan bovenleiding en beveiligingsinfrastructuur.

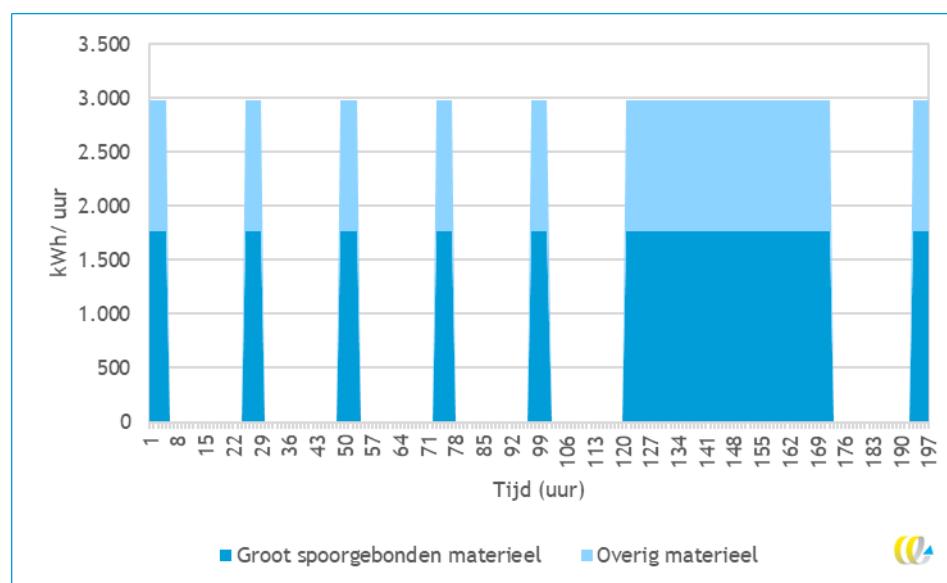
Het gehele project is ingedeeld in tien fasen. In deze studie kijken we specifiek naar Fase C150, met als voornaamste activiteit het bouwen van de sporen 11 en 12 en het aanleggen van nieuwe wissels en aansluitende sporen. Deze fase duurt ongeveer achttien weken, waarin 's nachts de werkzaamheden plaatsvinden van 00.00-05.00 uur. Er zijn daarnaast drie weekenden waarin 52 uur werkzaamheden worden uitgevoerd. De activiteiten omvatten de gehele vernieuwing van de bovenleiding en de draagconstructie. Huidige sporen en wissels komen vrij en worden afgevoerd. Spoor 10 is alleen beschikbaar voor werkverkeer, spoor 9 is wel beschikbaar voor regulierverkeer. Tijdens dit deel van de werkzaamheden worden ca. 200 verplaatsingen met vrachtauto's van en naar de bouwplaats ingeschat.

7.2 Energievraag op de bouwplaats

BAM heeft voor dit voorbeeldproject aangegeven welk materieel wordt ingezet tijdens de bovenbouwvernieuwing en hoeveel uren dit materieel wordt ingezet. Daarbij heeft BAM ook aangegeven op welk moment in het project het materieel actief is. Tabel 33 in Bijlage E.1 geeft per materieeltype de energievrage weer van het project zowel voor de huidige variant met diesel aangedreven materieel als van de toekomstige elektrische variant. Voor het project bedraagt de totale hoeveelheid dieselverbruik 18.450 liter voor al het materieel. Indien het materieel elektrisch wordt aangedreven is de totale energievrage 76.533 kWh elektriciteit.

Het materieel wordt gedurende achttien weken ingezet met nachtwerkzaamheden en drie maal weekend werkzaamheden. De veronderstelling is dat al het materieel continu wordt ingezet wanneer werkzaamheden plaatsvinden. Figuur 20 geeft de energievraag per uur weer indien al het materieel elektrisch zou zijn voor een week waarin ook weekendwerkzaamheden plaatsvinden. Het grote spoorgebonden materieel bestaat uit een stopmachine en twee werktreinen, die apart zijn weergegeven van het overige materieel. Het grote spoorgebonden materieel heeft een energievraag van 1.761 kWh per uur als deze actief is. Het overige materieel heeft een totale energievraag van 1.211 kWh per uur.

Figuur 20 - Energievraag (kWh/ uur) in week met een weekend van 52 uur



De aanvoer van materiaal voor de werkzaamheden gaat via de weg. Er zijn ongeveer 200 ritten met vrachtauto's van en naar de bouwplaats. Naar schatting zijn er gemiddeld twee ritten met een trekker-oplegger per nacht en veertien in de weekenden. We nemen aan dat de gemiddelde afstand 200 kilometer per retourrit is (dus in totaal 400 kilometer per nacht en 1.400 km in het weekend). De totale energievraag is gelijk aan 14.400 liter diesel of 67.210 kWh elektriciteit wanneer batterij-elektrische voertuigen worden ingezet (zie Tabel 36, Bijlage E.1). De helft van deze energievraag (33.605 kWh) zal op of nabij de bouwplaats zijn voor de voertuigen die materiaal hebben afgeleverd. De andere helft zal op de herkomst of vervolgbestemming zijn.

7.3 Energielevering bij elektrificatie van materieel

7.3.1 Middelgroot en groot materieel

Wisselaccu's

Bij de inzet van wisselaccu's kan een aansluiting van ongeveer 336 kW nabij de bouwplaats voorzien in voldoende capaciteit om de accupakketten voor de nacht-activiteiten op te laden. De totale energievraag in een nacht bedraagt 6.055 kWh en er na vijf uur werkzaamheden is er ruim achttien uur om de accu's bij te laden (zie Tabel 34, Bijlage E.1). Voor vaste accu's geldt dezelfde vermogen vraag.

Gedurende het weekend is bij het gebruik van wisselaccu's een aansluiting van ongeveer 1.476 kW nabij de bouwplaats nodig om te voorzien in voldoende capaciteit om de accu-pakketten op tijd te kunnen laden en te wisselen (zie Tabel 35, Bijlage E.1). Er is dan een totale energiebehoefte van 62.975 kWh voor middelgroot en groot materieel (zie Tabel 34, Bijlage E.1).

De tijd dat de werktuigen niet gebruikt kunnen worden door de accuwissel is het hoogst voor een kraan en wordt ingeschat op vijf uur (tien wissels à 30 minuten per wissel) gedurende het weekend van 52 uur.

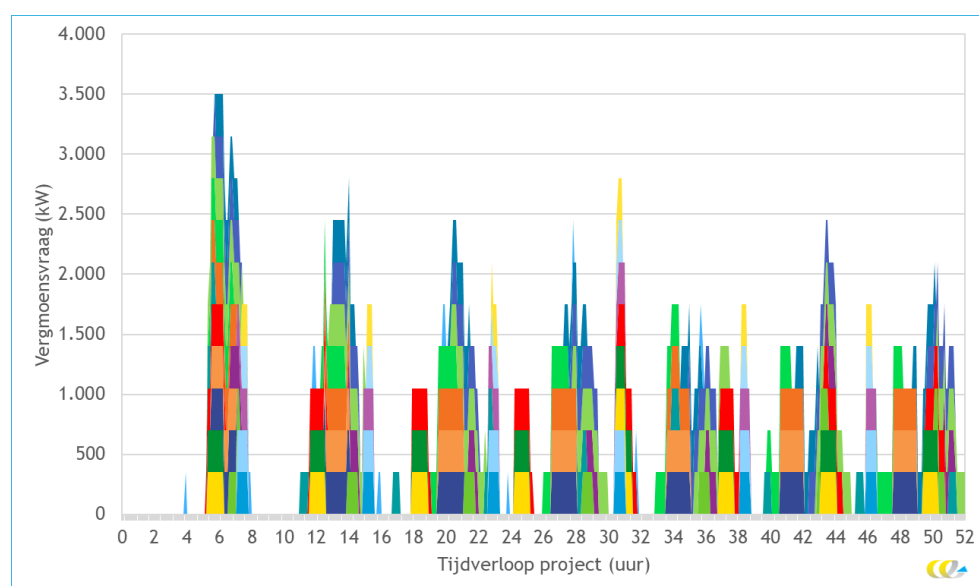
Bijladen met vaste batterijen in de werktuigen

Figuur 21 en Figuur 22 geven weer wat de vermogensvraag is om de vaste accu's bij te laden voor de optie wanneer dit wordt gedaan wanneer deze leeg is (Figuur 21) of gelijktijdig (Figuur 22). In het eerste geval zijn er in het uiterste geval tien werktuigen tegelijk aan het laden en komt de hoogste piek uit op 3.500 kW. Door iets slimmer te plannen kan het aantal werktuigen dat tegelijk laadt waarschijnlijk worden beperkt tot zeven of acht. Het totale benodigde vermogen is dan 2.450 (7 x 350 kW) of 2.800 kW (8 x 350 kW).

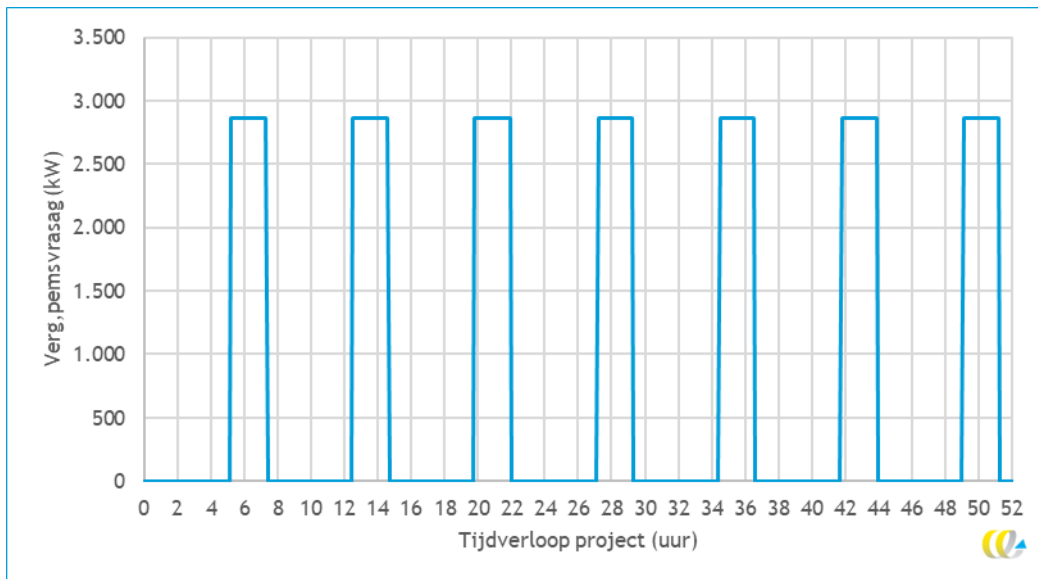
De laadduur varieert van 21 minuten voor een minigraver tot 133 minuten voor een kraan. De kraan moet tien keer bijladen en heeft de langste totale laadduur van 20 uur gedurende het project van 52 uur. Inclusief tijd om naar het laadstation te rijden schatten we de duur in op 22 uur.

Wanneer het laden synchroon gebeurt, is de eerste laadbeurt na 5,1 uur omdat de kraan dan moet bijladen. In dat geval komt voor al het materieel samen de vermogensvraag uit op 2,861 kW met laadmomenten die 2,2 uur duren en waarin in totaal 6228 kWh wordt bijgeladen (zie Tabel 35, Bijlage E.1). In totaal zijn er gedurende het project tien laadmomenten. De totale laadduur is ook hier 20 uur en inclusief tijd om naar het laadstation te rijden 22 uur. De laadtijd kan worden verkort door met een hoger vermogen te laden.

Figuur 2121 - Laadprofiel materieel indien wordt geladen als batterij leeg is



Figuur 2222 - Vaste accu's gelijktijdig bijladen



7.3.2 Groot spoorgebonden materieel

Gedurende een nacht van vijf uur is de energievraag van het grote spoorgebonden materieel in totaal 8.803 kWh voor twee werktreinen en één stopmachine. Om deze energie bij te laden gedurende de rest van de dag (uitgaande van 18 uur netto laadtijd) is een laadvermogen van 490 kW nodig. Gedurende het weekend is de energievraag in totaal 91.552 kWh. Voor een 52 uur weekend betekent dit dat wel 45 keer batterijcontainers van 2 MWh geladen moeten worden. Als we uitgaan van 4 MWh accucapaciteit (twee batterijcontainers) per werktrein, dan kan de werktrein 5,2 uur achtereen werken. Met een beschikbare laadtijd van 4,2 uur (5,2 minus 1 uur voor de wissel) om andere batterijcontainers op te laden voor een batterijwissel gaat het om een benodigd vermogen van 960 kW om de batterijcontainers op tijd geladen te kunnen krijgen. Voor de stoptrein kan met een 2 MWh batterijcontainer 9,5 uur gewerkt worden en is er 235 kW nodig om bij te laden in 8,5 uur. In totaal is er een vermogen nodig van 2.160 kW om de batterijcontainers op te laden. Op een stopmachine is het nog wel de vraag hoe deze van een batterijcontainer kan worden voorzien qua ruimte.

Uitgaande van batterijcontainers met 4 MWh capaciteit, moeten er in een weekend van 52 uur voor de werktrein wel tien wissels plaatsvinden. Of meerdere batterijcontainers moeten tegelijk op de werktrein worden gezet. Een dergelijke oplossing vraagt om een goed wisselstation voor batterijcontainers, en hiervoor moet plek zijn op de bouwplaats. Het is onzeker of dit een realistische oplossing is om het grote spoorgebonden materieel van energie te voorzien.

Energielevering via de bovenleiding zou een goedkopere optie zijn, mits dit veilig mogelijk is. Normaal gesproken kan dit niet vanwege de buitendienststelling.

7.3.3 Bouwlogistiek verkeer

De totale energievraag voor logistiek verkeer die op de bouwplaats is 2.352 kWh in het weekend (zie Tabel 12) en is veel kleiner dan de energievraag van het grote en middelgrote materieel (62.975 kWh). Wanneer voor het materieel met wisselaccu's wordt gewerkt kan voor het laden van de wisselbatterijen worden volstaan met een aansluiting van 1.476 kWh. Van de 76.766 kWh laadcapaciteit (52 x 1476 kWh) in 52 uur wordt dan 82% benut voor het laden van wisselbatterijen voor het materieel. Dit betekent dat er theoretisch nog ruimte is (13.777 kWh) om tussendoor de vrachtauto's (2.352 kWh) te laden. Voor de vrachtauto's is 3,5 uur laadtijd nodig. In het geval de laadstrategie met vaste accu's is er zeker voldoende capaciteit om bij te laden.

Tabel 12 Laadbehoefte bouwlogistieke voertuigen

Bouwlogistiek	Energievraag op bouwplaats in weekend (kWh)	Gemiddelde laadvraag per laadsessie voertuig (kWh)	Laadmomenten op bouwplaats (#)	Laadduur bij 350 kW/50 kW	Totale laadduur (uur)
Vrachtauto's aan en afvoer	2.352	168	7	0,5 (350 kW)	3,5 uur

7.4 Conclusie

Tabel 13 geeft een overzicht van het benodigde vermogen en de mogelijke laadoplossingen voor het project. Ook is voor het middelgrote en grote materieel aangegeven hoeveel extra laadtijd er nodig is voor het materieel dat het langst moet laden tijdens de werkzaamheden.

Tabel 13 - Overzicht vermogensvraag en laadoplossingen

Categorie materieel voertuigen	Benodigd vermogen aansluiting op bouwplaats (kW)	Laadoplossingen	Maximale extra benodigde tijd voor laden/accuwissel materieel
Groot en middelgroot materieel batterij-elektrisch	Weekend: 1.476 kW Weekdagen: 336 kW	Wisselaccu's.	5 uur/52 uur
	Weekend: 2.450-2.800 kW Weekdagen: 336 kW	Vaste accu's laden indien leeg.	22 uur/52 uur
	Weekend: 2.861 kW Weekdagen: 336 kW	Vaste accu's synchroon laden.	22 uur/52 uur
Groot spoorgebonden materieel met batterijcontainers	Weekend: 2.160 kW Week: 490 kW	Bijladen accucontainers.	-
Bouwlogistiek	0 kW (extra)	Restcapaciteit materieel kan worden ingezet, anders laadvoorziening nabij bouwplaats.	-

8 Case 6: Regulier onderhoud Zee tot Zevenaar (VolkerRail)

8.1 Beschrijving project

Het Project Zee tot Zevenaar betreft het regulier onderhoud van het spoor tussen Rotterdam (Zee) en Zevenaar. VolkerRail maakt hierbij gebruik van RailInzetPlaatsen en Railinfra Opstel Plaatsen. Op de RailInzetPlaats verzamelen de werkploegen en gaan de railwegvoertuigen het spoor in. Bij de RailinfraOpstelPlaatsen wordt het spoorgebonden materieel opgesteld en start vanuit hier het werk. De Rail Inzet Plaatsen zijn beschikbaar iedere 5-10 km langs het spoort terwijl RailinfraOpstelPlaatsen bij emplacementen een regionale functie hebben.

De werkzaamheden voor regulier onderhoud binnen het project Zee tot Zevenaar vinden voornamelijk in de nacht plaats gedurende een periode van zeven of acht uur vanuit steeds andere inzetplaatsen. Het materieel wordt gedurende het jaar verplaatst van inzetplaats naar inzetplaats. Voor het materieel zijn er om de 5-10 kilometer diverse inzet en opstelplaatsen van VolkerRail, waar in de toekomst elektrisch materieel zou kunnen worden geladen. Gemiddeld genomen wordt een opstelplaats één maal in de twee weken gebruikt voor werkzaamheden. Voor een onderhoudsklus worden typisch 2-4 railwegvoertuigen gebruikt, zoals een krol. Ook wordt groot tot zeer groot specialistische materieel ingezet bij regulier onderhoud. Tenslotte komen er 4-12 bestel- en personenauto's tijdens de werkzaamheden naar de bouwplaats.

8.2 Energievraag en energielevering op de bouwplaats

De werkzaamheden voor regulier onderhoud zijn met 7-8 uur iets langer dan andere onderhoudsprojecten op het Nederlandse spoor die meestal 4-5 uur duren. De tijdspanne is echter beperkt en het accupakket van een machine zal over het algemeen toereikend zijn om de werkzaamheden, meestal 's nachts, uit te voeren. Dit betekent dat voor het bijladen relatief veel tijd beschikbaar is. Er is dan ook geen groot verschil tussen de beschikbare tijd voor het bijladen van vaste- en van wisselaccu's. Als voorbeeld voor de inzet bij regulier onderhoud gaan we voor het middelgrote en grote materieel uit van:

- twee werktuigen zoals een krol, met een accupakket van 300 kWh en een verbruik van 40 kW;
- een zwaarder stuk materieel, zoals een shovel, met een accupakket van 600 kWh en een verbruik van 80 kWh/uur

Het totale verbruik van deze drie voertuigen op een nacht zit in de range van 1.120 kWh (zeven uur) tot 1.280 kWh (acht uur) vanuit één RailInzetPlaats. Rekening houdend met transporttijd van het bouw materieel tussen de bouwplaatsen schat de aannemers in dat er netto ongeveer zeven uur laadtijd beschikbaar is. Een aansluiting met 160-180 kW laadvermogen op de opstelplaats is dan voldoende om de accu's van het materieel bij te laden.

Voor het zware materieel gaan we als voorbeeld uit van de inzet van:

- een stopmachine met een motorvermogen van 450 kW een ingeschat verbruik van 135 kWh/uur;
- een werktrein met een motorvermogen van 1.000 kW en een verbruik van 400 kWh/uur.

Het totale verbruik op een nacht varieert dan van 3.745 kWh (zeven uur) tot 4.280 kWh (acht uur) vanuit één Rail Inzet Plaats. Om een nacht van zeven tot acht uur te kunnen werken is, uitgaande van het gebruik van batterijcontainers, voor de stopmachine een batterijcontainer nodig met een capaciteit van ongeveer 1 MWh en voor de werktrein een batterijcontainer met een capaciteit van ongeveer 3 MWh. Mogelijk kunnen deze treinen deels via de bovenleiding worden bijgeladen, op momenten dat de bovenleiding gewoon in gebruik is (als er niet aan de bovenleiding wordt gewerkt). Als dit niet kan is, uitgaande van zeven uur laadtijd, een aansluiting van 535-611 kW laadvermogen op de opstelplaats voldoende om de batterijcontainers bij te laden.

Tijdens de werkzaamheden kan de laadinfrastructuur op locatie worden gebruikt om voertuigen te laden die naar de bouwplaats zijn gereden van bijvoorbeeld personeel. In totaal kan de laadvoorziening van de middelgrote en grote werktuigen dan ongeveer 1.120-1.460 kWh leveren aan wegvoertuigen tijdens de werkzaamheden. Uitgaan de van twaalf voertuigen is dit 93-120 kWh per voertuig. Met 93 kWh bijladen kunnen zwaardere bestelauto's (0,4 kWh/km) al 230 kilometer rijden. Personenauto's zelfs het dubbele.

8.3 Conclusie

Tabel 14 geeft een overzicht van het benodigde vermogen en de mogelijke laadoplossingen voor het project.

Tabel 14 - Overzicht vermogensvraag en laadoplossingen

Categorie materieel voertuigen	Benodigd vermogen aansluiting op bouwplaats (kW)	Laadoplossingen	Maximale extra benodigde tijd voor laden/accuwissel materieel
Groot en middelgroot materieel batterij-elektrisch	160-180 kW	Wisselaccu's/vaste accu's	N.v.t.
Zwaar spoorbonden materieel	530-600 kW	Bijladen batterijcontainers	N.v.t.
Bouwlogistiek	0 kW extra	Restcapaciteit materieel kan worden ingezet, of laadvoorziening nabij bouwplaats	N.v.t.

9 Aansluitingen bij ProRail

ProRail is in de unieke situatie dat ze zelf een energienet beheert. Dit energienet kan op verschillende manieren worden ingezet om laadvoorzieningen voor werktuigen te creëren. Mogelijkheden waaraan wordt gedacht zijn de volgende¹¹:

- Aansluiten op onderstations: Onderstations voorzien de bovenleiding van energie en liggen om de 5-10 kilometer langs het spoor. Een onderstation kan een spanning leveren van 2 MW of meer. Omdat treinen niet continu langsrijden is er een behoorlijke rest-capaciteit op de onderstations die mogelijk ingezet kan worden. Bij onderstations zouden permanente laadvoorzieningen kunnen worden gerealiseerd. Enerzijds om materiaal te laden indien er bouwprojecten in de buurt zijn. Anderzijds om bijvoorbeeld batterijcontainers te laden die ingezet kunnen worden voor het grote materieel bij spoorwerkzaamheden, maar mogelijk ook voor andere toepassingen, zoals bijvoorbeeld binnenvaart. Door de laadvoorziening optimaal te gebruiken, kunnen de kosten van de aan te leggen laadinfrastructuur per kWh afgezette elektriciteit laag blijven.
- Aansluiten op het (toekomstige) 10 kV voedingssysteem: Tussen onderstations ligt een voedingssysteem, dat op dit moment over het algemeen 3 kV is. Langs de Betuweroute en op enkele plekken bij Amsterdam en Rotterdam is het al 10 kV. Dit systeem verbindt de onderstations en kan ook hogere vermogens (> 1MW) leveren.
- Aansluiten op de bovenleiding: Tijdens werkzaamheden zoals bovenbouwvernieuwing en werkzaamheden aan de bovenleiding zelf wordt de bovenleiding meestal vaak spanningsloos gemaakt tijdens die fysieke bouwwerkzaamheden vanwege veiligheid op de bouwplaats. Op nabijgelegen stukken spoor kan echter nog wel spanning staan en zou via een stroomafnemer stroom naar de bouwplaats kunnen worden gebracht. Tijdens voorbereidende werkzaamheden en werkzaamheden bij afronding is er vaak wel spanning op de bovenleiding en kan de bovenleiding ook gebruikt worden.
- Materieel op het spoor kan mogelijk bijladen via een stroomafnemer van nabijgelegen stukken spoor die wel onder spanning staan. Als het bijladen stilstand gebeurt, moeten wel aanpassingen worden gedaan aan de bovenleiding, om te voorkomen dat deze smelt. Voor onderhoudswerkzaamheden kunnen dergelijke laadvoorzieningen ook bij de opstelplaatsen van materieel worden gerealiseerd.

Met bovenstaande mogelijkheden kunnen grotere vermogensaansluitingen naar de bouwplaats worden gebracht. Er is vervolgens ook laadinfrastructuur nodig om het materieel te laden. Om de investering voor laadinfrastructuur rendabel te maken is het van belang dat er veel afname is van elektriciteit op deze laadinfrastructuur. Dit kan enerzijds worden gerealiseerd door de laadinfrastructuur mobiel te maken, zodat deze kan meeverhuizen naar andere bouwplaatsen. Anderzijds kan op punten die centraal gebruikt worden, gezocht worden naar andere afzetmogelijkheden. Het laden van batterijcontainers voor verschillende toepassingen kan mogelijk een laadpunt rendabel maken.

¹¹ De beschrijving hier gaat niet in op de technische aanpassingen die nodig zijn of de juridische inbedding die nodig is om stroom aan derden te mogen leveren.

10 Conclusies en discussie

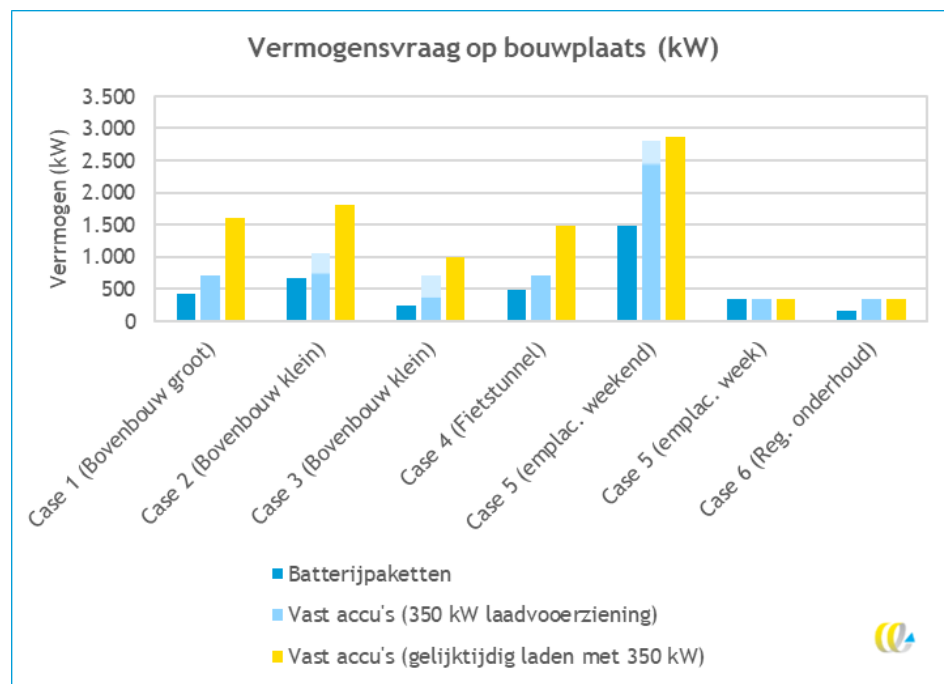
Voor verschillende type bouwplaatsen is de vermogensbehoefte bepaald wanneer al het materieel batterij-elektrisch wordt aangedreven. Er is daarbij onderscheid gemaakt naar

- middelgroot en groot materieel;
- (zeer) groot materieel dat over het algemeen treinen betreft;
- bouwlogistiek verkeer.

Middelgroot en groot materieel

Figuur 23 geeft een overzicht van de vermogensvraag voor middelgroot en groot materieel voor de verschillende projecten en verschillende laadscenario's.

Figuur 23 - Vermogensbehoefte middel groot en groot materieel per project en laadstrategie



De vermogensvraag varieert tussen 170 kW voor regulier onderhoud tot 2.860 kW voor de emplacementsvernieuwing wanneer werktuigen met vaste accu's gelijktijdig in laadpauzes worden opgeladen. Er zijn vanuit ProRail in principe mogelijkheden om dit soort vermogens op de bouwplaats aan bieden, via onderstations, het 10 kW-net of de bovenleiding. Het hangt voornamelijk van de locatie af in hoeverre het daadwerkelijk mogelijk is. Het project met de hoogste vermogensvraag is de emplacementsvernieuwing in Den Haag. In dit project wordt continu met een groot aantal werktuigen gewerkt gedurende 52 uur in het weekend. Er is eigenlijk geen tijd beschikbaar om te laden gedurende de 52 uur. In het geval van materieel met wisselbatterijen, moeten deze continu bijgeladen worden om continu doorgewisseld te kunnen worden. In het geval van vaste accu's in het materieel, moet zo snel mogelijk bijgeladen worden om het werkproces niet teveel te verstoren.

Uitgaande van 350 kW vermogen per stuk materieel loopt de vermogensvraag dan snel op tot 2.450-2.860 kW in het geval van de emplacementsvernieuwing. De vermogensvraag kan beperkt worden wanneer het materieel gespreid gaan laden. De vermogensvraag is hoger wanneer al het materieel gelijktijdig geladen wordt. Dit is in principe niet gunstig voor het benodigde vermogen, maar zorgt er wel voor dat materieel gelijktijdig ingezet kan worden. Projecten hebben een veel lagere vermogensvraag wanneer er minder materieel wordt ingezet (regulier onderhoud), maar ook wanneer de werktijd beperkt is en er voldoende tijd is om te laden, zoals in het geval van de nachtwerkzaamheden bij de emplacementsvernieuwing (Case 5 week). De batterijcapaciteit is dan voldoende om de werkzaamheden in één keer uit te voeren zonder bijladen. Daarna is er ruim tijd om het materieel bij te laden voor de volgende nacht waarmee het benodigde laadvermogen beperkt blijft.

Tabel 15 geeft een overzicht van de maximaal benodigde laadtijd (inclusief materieel verplaatsen en aan- en afkoppelen) voor het materieel dat het langst moet laden tijdens de werkzaamheden en daarmee dus de werktijd verlengt. De laadtijd geldt voor de periode aangegeven in de laatste kolom. De tabel laat zien dat 2-10% meer tijd nodig is als wordt gewerkt met wisselbatterijen en 8-42% meer tijd wanneer met vaste accu's wordt gewerkt. Dit geldt wanneer we aannemen dat er geen extra materieel wordt ingezet. Met wisselaccu's kan de extra laadtijd dus aanzienlijk beperkt worden. Het nadeel van wisselaccu's is wel dat het meer handelingen vereist met de accu's op de bouwplaats. Een robuust accusysteem en goede wisselplaatsen zijn dan een vereiste. Daarnaast zijn er meer accu's nodig op de bouwplaats. Een extra wisselaccu verhoogd naar schatting de kosten met 3-8 eurocent per kWh (ref RWS).

Tabel 15 - laadtijd gedurende beschouwde periode voor materieel met langste totale laadduur in uur en percentage van beschouwde periode

	Accuwissel [uur (%)]	Vaste accu laden als leeg [uur (%)]	Vaste accu, tegelijk laden [uur (%)]	Beschouwde periode [uur]
Case 1: (Bovenbouw Groot)	6 (6%)	19 (18%)	19 (18%)	103
Case 2: (Bovenbouw klein)	2,5 (5%)	6,25 (12%)	8,4 (16%)	52
Case 3: (Bovenbouw klein)	2 (6%)	4,4 (12%)	4,4 (12%)	36
Case 4: (Fietstunnel)	0,5 (2%)	2 (8%)	2 (8%)	24
Case 5: (Emplac. weekend)	5 (10%)	22 (42%)	22 (42%)	52

Zeer groot materieel

Het zeer grote spoorgebonden materieel betreft over het algemeen treinen. Als deze treinen geen gebruik van een bovenleiding kunnen maken zou een batterijcontainer die een oplossing kunnen bieden. Eén of twee batterijcontainers kunnen vaak voldoende energie leveren voor werkzaamheden die zes uur duren. Het is dan van belang dat er faciliteiten zijn om de batterijcontainer naderhand te wisselen, of bij te laden op de trein, indien deze niet verder ingezet hoeft te worden. Tabel 16 geeft een overzicht van de benodigde vermogens op de bouwplaats als deze op de bouwplaats (bij)geladen worden. Bij Case 1 is daarbij alleen uitgegaan van materieel dat bijgeladen moet worden en is aangenomen dat bij de start van het project de overige containerbatterijen geladen zijn. Voor de andere projecten is uitgegaan van volledig (bij)laden op de bouwplaats. De resultaten laten zien dat op projecten waar de werktrein voor een langere periode achtereen nodig is (Case 4 en 5), het benodigde vermogen voor laadinfrastructuur veel hoger is dan bij de cases waar de uitvoeringstijd beperkter is en er meer tijd is om bij te laden. Ook zijn in Case 3 en 4 het aantal batterijwissels hoog. Voor deze projecten is het aan te bevelen om ook naar andere

alternatieven te kijken om zero-emissie te worden, vanwege de hoge benodigde vermogens op de bouwplaats, maar ook omdat het veel wisselen van batterijcontainers een behoorlijke uitdaging is. Gedacht kan worden aan een alternatieve brandstof (waterstof, e-fuels), een aangepast werkschema, met voldoende laadtijd tussendoor of een mogelijkheid om toch van de bovenleiding gebruik te maken.

Tabel 16 Overzicht energievraag zeer groot materieel en resulterende vermogensvraag

Project	Type materieel	Totale energievraag	Benodigd vermogen voor (bij)laden
Case 1: (Bovenbouw Groot)*	Al het zeer groot materieel	100.800 kWh	Niet bepaald
	Kettinghor bijladen	3.000 kWh	254 kW
Case 2: (Bovenbouw klein)	Stopmachine laden	1.890 kWh	80 kW
Case 3: (Bovenbouw klein)	Stopmachine laden	415 kWh	28 kW
Case 4: (Fietstunnel)	Al het zeer groot materieel continu bijladen	17.591 kWh	1.235 kW
Case 5: (emplac. <i>weekend</i>)	Al het zeer groot materieel continu bijladen	91.522 kWh	2.160 kW
Case 5: (emplac. <i>weekdagen</i>)	Al het zeer groot materieel bijladen	8.803 kWh	490 kW

Bouwlogistiek verkeer

Voor de verschillende laadopties voor de werktuigen is er in veel gevallen restcapaciteit gedurende een aantal momenten dat de laadinfrastructuur niet volledig gebruikt wordt. Over het algemeen blijkt bij de verschillende projecten voldoende capaciteit te zijn om ook de wegvoertuigen die de bouwplaats aandoen, bij te laden, mits dit goed ingepland kan worden. In een paar gevallen is er wel een extra vermogen nodig om alle wegvoertuigen van energie te kunnen voorzien. Er kan natuurlijk ook voor gekozen worden om dan in de omgeving van de bouwplaats te laden bij een laadstation.

Discussie

De resultaten geven in een bandbreedte weer hoeveel vermogen er op de bouwplaats nodig is wanneer deze wordt ingericht voor batterij-elektrische werktuigen. Waar mogelijk hebben we in de analyse rekening gehouden met de precieze inzet van werktuigen, maar niet in alle gevallen kon deze inzet precies gegeven worden door de aannemers. Indien werktuigen meer rustmomenten hebben, kan de vermogensvraag mogelijk lager uitkomen dan door ons berekend.

In de doorrekening van de vermogensbehoefte is uitgegaan van de doorlooptijd zoals deze op dit moment gebruikelijk is voor de projecten. In algemene zin geldt dat wanneer er meer tijd is voor de uitvoering en er meer tijd is om bij te laden, de vermogensbehoefte van het materieel zal afnemen.

In de huidige analyse zijn we uitgegaan van laden met vermogens van 350 kW bij vaste accu's. Op dit moment is het al een redelijk uitdaging om met dit soort vermogens te laden. In de toekomst kunnen echter ook hoger laadvermogens mogelijk worden. Zowel laadinfrastructuur als batterijen moeten daarvoor dan geschikt zijn. De laadtijd kan dan verder worden teruggebracht en het laden van materieel met vaste accu's wordt dan aantrekkelijker.

11 Referenties

CE Delft, 2021. *STREAM Goederenvervoer 2020 (versie 2)*, Delft: CE Delft.

TNO, 2020. TNO getallen voor AERIUS 2020v9 mobiele werktuigen, Den Haag: TNO
www.zenodo.org/record/4138573/files/TNO_getallen_voor_AERIUS_2020v9_mobiele_werktuigen.xlsx.

TNO, 2021. *AUB (AdBlue verbruik, Uren, en Brandstofverbruik)*, Den Haag: TNO.

TNO, 2022. *Inventarisatie en categorisatie huidige en toekomstige aanbod duurzame mobiele werktuigen, bouwlogistieke voertuigen, spoorwerktuigen en vaartuigen die worden ingezet voor de waterbouw*, Den Haag: TNO, Trafic & Transport.

Bijlagen

De bijlagen zijn vertrouwelijk. Indien u meer informatie wenst over de inhoud van de bijlagen, kunt u contact opnemen met opdrachtgever ProRail, Ron Jasker (ron.jasker@prorail.nl).

