

Notitie

Aan

Projectteam Programma Schoon en Emissieloos Bouwen

Van

Dennis Tol, Siem van Merriënboer, Annette Rondaij, Jorrit Harmsen, Pim van Mensch

Onderwerp

Schoon en Emissieloos Bouwen: Opties voor laad- en tankinfrastructuur voor mobiele werk-, wegvoer-, spoorvoer- en vaartuigen voor de bouwsector

Traffic & Transport

Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
Postbus 96800
2509 JE Den Haag

www.tno.nl

T +31 88 866 00 00

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

E-mail

dennis.tol@tno.nl

Datum
14 juli 2022

Onze referentie
TNO-2022-NOT-100345396

Blad
2/43

1. Inleiding

Bouwlocaties zijn van tijdelijke aard en bevinden zich vaak op plekken waar geen of weinig laad- en tankinfrastructuur aanwezig is voor uitstootvrij¹ materieel. Dit geldt met name voor de voorziening van elektriciteit en waterstof. In de huidige situatie, waar veel gewerkt wordt met conventionele diesel- en benzine-aangedreven machines en voertuigen, is de infrastructuur voor tanken goed op orde. Bij de transitie naar uitstootvrij is de energie-infrastructuur complexer. De mate van complexiteit is onder andere afhankelijk van de locatie van de bouwplaats, het aantal en type machines of voer- of vaartuigen, en de inzet ervan. Ten behoeve van de totstandkoming van de routekaart 'Schoon en Emissieloos Bouwen' wordt in deze notitie inzicht gegeven in de verschillende opties voor tank- en laadinfrastructuur.

De focus in deze notitie ligt op het opladen van elektrisch materieel voor de bouwsector en het tanken van waterstof-aangedreven mobiele werktuigen en wegtransportmiddelen. Deze notitie richt zich daarmee op de opties om energie op de bouwplaats te krijgen middels elektriciteit en/of waterstof. Elektrisch aangedreven werk- en voertuigen kunnen door middel van accu's opereren of door een vaste bekabelde aansluiting op het elektriciteitsnetwerk. De accuvarianten kunnen met zowel verwisselbare accu's als vaste accu's worden uitgerust. Daarnaast is waterstof in combinatie met een brandstofcel feitelijk ook een elektrische aandrijving. Waterstof in een verbrandingsmotor is ook mogelijk, al is deze laatste niet lokaal uitstootvrij (er komen luchtverontreinigende uitlaatemissies zoals NO_x en fijnstof vrij); dit is wel het geval voor waterstof in combinatie met een brandstofcel.

In deze notitie wordt een aantal energievoorzieningen (zie scope) uiteengezet waarbij de onderstaande aspecten beknopt toegelicht worden:

- milieu-impact;
- kosten;
- marktrijpheid;
- toepasbaarheid;
- impact op infrastructuur; en
- veiligheid.

Om goed aan te sluiten bij de praktijk wordt in deze notitie gewerkt met een aantal use-cases, waarbij de energiebehoefte en de vermogensvraag voor diverse bouwplaatsen is doorgerekend.

Deze notitie is tot stand gekomen op basis van beschikbare kennis binnen TNO vanuit recente en lopende onderzoekstrajecten op dit gebied, aangevuld met een analyse van relevante studies uit externe bronnen. Input voor de use-cases is door een partij uit de markt aangeleverd.

¹ Er zijn nog wel fijnstofemissies door slijtage (banden, remmen en wegdek), dit is met name relevant voor het wegverkeer.

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

3/43

1.1 Onderzoeksvraag

Wat zijn de opties voor de laad- en tankinfrastructuur voor uitstootvrije mobiele werktuigen, wegvoertuigen (ingezet voor bouwlogistiek), spoorwerktuigen en vaartuigen, en welke eisen en randvoorwaarden horen bij de inzet daarvan op een bouwplaats?

1.2 Scope

Deze notitie richt zich op de laad- en tankinfrastructuur ten behoeve van mobiele werk-, wegvoer-, spoorvoer- en vaartuigen die worden ingezet in de bouwsector.

In deze notitie worden de volgende opties voor energievoorziening op de bouwplaats en voor voertuigen met een inzet in de bouw beschreven:

- *Elektriciteit*
 - *Directe netaansluiting*
 - *Mobiele batterijcontainer*
 - *Verwisselbare interne accu (+ eventueel laden op alternatieve locatie)*
- *Waterstof*
 - *Waterstofcontainer*
 - *Waterstofcontainer + waterstofstroomaggregaat*
- *Alternatieve brandstoffen voor vaartuigen in de waterbouw*

Deze lijst is niet allesomvattend maar bevat de meest gangbare opties voor de korte en middellange termijn.

Daarnaast wordt onderscheid gemaakt naar laad-/tankmogelijkheden voor de volgende situaties en bouwlocaties:

- *Binnenstedelijk op de bouwplaats*
- *Buitenstedelijk op de bouwplaats*
- *Bouwhubs/laadhubs*
- *Private infrastructuur (bijv. bedrijventerreinen)*
- *Publieke infrastructuur (bijv. publieke laadpunten)*
- *Spoor*
- *Waterbouw*

1.3 Leeswijzer

In deze notitie wordt in hoofdstuk 2 ingegaan op de verschillende opties van laad- en tankinfrastructuur aan de hand van voorbeelden uit de praktijk. Vervolgens zijn in het tweede deel van hoofdstuk 2 de locaties waar uitstootvrije mobiele machines en bouwlogistieke voertuigen ingezet worden en dus gebruik moeten kunnen maken van laad- en tankinfrastructuur beschreven. De locatie is een belangrijk aspect, omdat afhankelijk van de locatie andere laad- en tankstrategieën toepasbaar zijn. In hoofdstuk 3 worden dezelfde onderwerpen als in hoofdstuk 2 behandeld, maar dan voor spoorwerktuigen en de waterbouw. In hoofdstuk 4 wordt aan de hand van casestudies de energie- en vermogensvraag voor verschillende type bouwplaatsen ingeschat. Dit is om inzicht te geven in de verschillende keuzes die gemaakt kunnen worden op het gebied van laadstrategie. Tot slot gaat hoofdstuk 5 in op de conclusies en aanbevelingen.

2. Opties voor laad- en tankinfrastructuur & laadlocaties voor mobiele werktuigen en wegvervoer (bouwlogistiek)

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

4/43

2.1 Opties voor laad- en tankinfrastructuur

Aan de hand van praktijkvoorbeelden worden in deze paragraaf vijf opties voor laad- en tankinfrastructuur voor uitstootvrij materieel gepresenteerd. Voor alle opties geldt dat ze ingezet kunnen worden om uitstootvrije mobiele werktuigen en bouwlogistieke wegvoertuigen te voorzien van energie.

Directe netaansluiting

Een directe netaansluiting is een elektriciteitsaansluiting die gebruikt wordt gedurende de bouwperiode en door de netbeheerder wordt aangelegd. Daarbij wordt gebruik gemaakt van het bestaande elektriciteitsnetwerk. Een directe netaansluiting is de meest efficiënte oplossing voor de benodigde energiebehoefte (laagste energieverliezen) op de bouwplaats. Echter is dat niet voor alle toepassingen mogelijk vanwege de locatie of de hoogte van de vermogensbehoefte. De toepasbaarheid van deze optie is in de eerste plaats afhankelijk van de aanwezigheid van een bestaand elektriciteitsnetwerk nabij de bouwplaats, of de noodzaak om een netwerkaansluiting te realiseren voor hetgeen dat gebouwd gaat worden (bijvoorbeeld een woonwijk of fabriek). Op de tweede plaats moet de capaciteit van het netwerk toereikend en beschikbaar zijn op het moment dat de capaciteit nodig is. Een directe netaansluiting moet tijdig worden aangevraagd bij de netbeheerder. Een belangrijk aandachtspunt is de toenemende schaarste aan beschikbare netcapaciteit (wat niet alleen speelt voor elektrificatie in de mobiliteitssector). Netbeheer Nederland (brancheorganisatie voor elektriciteits- en gasnetbeheerders) heeft namens de netbeheerders een brief gestuurd aan de kabinetsformaten met daarin 10 punten waarop het nieuwe kabinet kan sturen om de uitbreiding en aanpassing van het net mogelijk te maken [1]. Hierin wordt onder andere gevraagd om meer mogelijkheid om te kunnen prioriteren en om middelen om sneller meer infrastructuur te realiseren.

Mobiele batterijcontainers

Een mobiele batterijcontainer kan op een alternatieve locatie geladen worden en per truck van en naar de bouwplaats worden vervoerd. Een mobiele batterijcontainer kan ook in combinatie met een directe netaansluiting toegepast worden. De batterijcontainer kan met een laag vermogen constant worden bijgeladen en energie leveren om piekvermogens op te vangen of om het materieel met een hoger vermogen te kunnen laden dan met de directe netaansluiting mogelijk is, of om te laden op een moment dat er weinig capaciteit beschikbaar is op het net. Figuur 1 laat ter illustratie zien hoe zo'n batterijcontainer eruit kan zien. Er zijn diverse aanbieders op de markt voor deze vorm van energieopslag.



Figuur 1: Batterijcontainer, bron foto: Greener²

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

5/43

Een ander voorbeeld van een toepassing in de bouw is in het DKTI VERZET-project³. Daar wordt gebruikt gemaakt van mobiele snelladers van 300 kW om elektrische vrachtwagens op te laden terwijl ze bezig zijn met het laden/lossen van materialen op de bouwplaats⁴. Een container gevuld met 442 kWh aan batterijcapaciteit fungeert hier als energieopslagsysteem en als snellader. Een elektrische truck werkt ook met accu's in deze orde grootte. Het volledig bijladen van een elektrische truck duurt met deze oplossing ruim een uur en kost de energie-inhoud van een volledig container-accupakket. Op een drukke bouwplaats is een veelvoud van dit type accupakketten nodig om in de energievraag te voorzien, zie ook de case-studies in hoofdstuk 4. De mobiele batterij wordt gevoed door een aansluiting van 63 Ampère, wat doorgaans goed voorhanden is op bouwplaatsen. Zonder de batterijcontainer is het niet mogelijk om met de 63A aansluiting te snelladen. De snellader is geplaatst op een skid. Dit is een open containerframe dat ervoor zorgt dat de snellader eenvoudig kan worden verplaatst en tegelijkertijd beschermd wordt. De mobiele snellaadpunten kunnen worden gebruikt door zowel elektrische vrachtauto's als door mobiele machines op de bouwplaats.

² <https://www.greener.nl/nl/onze-services/emissievrije-bouwplaats/>

³ <https://www.rvo.nl/initiatieven/dkti-tenders/versnelde-evolutie-rotterdams-zero-emissie-transport-bouwsector>

⁴ <https://vlotlogistics.nl/300kW-snelladers/>

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

6/43



*Figuur 2: Mobiel snellaadpunt dat wordt gebruikt in het DKTI VERZET-project.
Bron foto: Vlot Logistics.*

Voor de binnenvaart loopt er momenteel een project van ZES⁵ (Zero Emission Services) waarbij verwisselbare containers van 2 MWh op een binnenvaartschip kunnen worden geplaatst. Een vergelijkbaar concept zou in de toekomst mogelijk elektriciteit kunnen leveren voor de bouwplaats. Containers worden in dat geval op de bouwplaats geplaatst en verwisseld als ze leeg zijn. Nadeel van dit concept is dat dit leidt tot een toename van transportbewegingen door transport tussen oplaadlocatie en toepassingslocatie (bouwplaats). In de huidige situatie moet ook fossiele brandstof worden aangeleverd, maar door de hogere energiedichtheid van diesel zijn er minder transportbewegingen nodig, zie ook Hoofdstuk 4.

Verwisselbare interne accu's

Wanneer een machine verwisselbare accu's heeft kan het voertuig of de machine continu ingezet blijven worden. De accu's kunnen op de bouwplaats worden geladen indien er een aansluiting is met voldoende capaciteit. De accu's kunnen ook op een alternatieve locatie worden geladen indien er geen aansluiting beschikbaar is. Indien de accu's op een alternatieve locatie geladen worden leidt dit tot extra transportbewegingen tussen oplaadlocatie en toepassingslocatie (bouwplaats). Een voorbeeld van een werktuig dat beschikt over een verwisselbaar accupakket is de elektrische graafmachine uit Figuur 3. De accupakketten zijn niet per definitie universeel voor verschillende machines.

⁵ <https://zeroemissionservices.nl/en/zespak-2/>

**Datum**

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

7/43

Figuur 3: Doosan elektrische graafmachine met verwisselbare accu. Bron foto: Staad-groep¹.

Waterstof-container met vulpunt

Huidig bekende toepassingen van waterstof-containers doen zich voornamelijk voor bij pilots in de binnenvaart. In de projecten FELMAR⁶ en WEVA⁷ worden ontwikkelingen en tests uitgevoerd aan een waterstof-elektrische aandrijflijn voor binnenvaarttoepassingen⁸. Een soortgelijke toepassing kan ook in de bouwsector interessant zijn, waarbij een waterstof-container op de bouwplaats wordt geplaatst en elders wordt gevuld. Hiermee kunnen waterstof aangedreven voertuigen en werktuigen op de bouwplaats worden bijgevuld. Voor een waterstofvulpunt is ook een elektriciteitsaansluiting nodig.

Waterstof-stroomaggregaat

Momenteel worden met name diesel-aangedreven stroomaggregaten toegepast op bouwplaatsen voor de stroomvoorziening (als er geen directe netaansluiting is, of als deze niet toereikend is). Momenteel wordt dit vooral toegepast voor het leveren van stroom aan bijvoorbeeld de bouwkeet en pompen. Voor elektrische machines en voertuigen is het toepassen van een diesel-aangedreven stroomaggregaat geen optie. Er worden dan immers geen emissies gereduceerd.

In plaats van een diesel-aangedreven stroomaggregaat kan ook een waterstof-aangedreven stroomaggregaat toegepast worden voor de stroomvoorziening indien er geen netaansluiting aanwezig is. Dit kan zowel waterstof in combinatie met een brandstofcel zijn, alsook waterstof direct in een verbrandingsmotor, al komen bij de laatste variant nog steeds lokaal luchtverontreinigende uitlaatemissies vrij (waaronder NO_x en fijnstof). Een voorbeeld van een waterstof-stroomaggregaat is weergegeven in Figuur 4.

⁶ <https://projecten.topsectorenergie.nl/projecten/marinisering-en-integratie-van-waterstoftechniek-voor-binnenvaart-en-short-sea-toepassingen-31425>

⁷ <https://projecten.topsectorenergie.nl/projecten/waterstof-elektrisch-vrachtschip-antonie-33066>

⁸ <https://www.topsectorenergie.nl/spotlight/eerste-binnenvaartschip-op-waterstof-komt-eraan>

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

8/43



Figuur 4: Waterstof-aggregaat. Bron foto: Bredenoord ⁹

Een ander voorbeeld is een waterstof-stroomaggregaat op basis van een waterstofdrager, bijvoorbeeld Hydrozine (mierenzuur). De waterstofdrager wordt dan lokaal omgezet in waterstof. Een voorbeeld hiervan is het een Hydrozine stroomaggregaat. Ook dit concept brengt extra vervoersbewegingen tot stand voor het aanleveren van de brandstof in vergelijking tot diesel.



Figuur 5: Hydrozine-aggregaat. Bron foto: Dens ¹⁰

⁹ <https://www.bredenoord.com/en/rental/specials/fuel-cell-generator-purity/>

¹⁰ <https://dens.one/products/>

2.2 Locatie van de laad- en tankinfrastructuur

Welke optie geschikt is als energievoorziening voor mobiele werktuigen en bouwlogistieke voertuigen is onder meer afhankelijk van de locatie van de bouwplaats en de locatie waar laad- en/of tankinfrastructuur gerealiseerd wordt. Mobiele werktuigen zijn afhankelijk van de energievoorziening op de bouwplaats waarbij de locatie van de bouwplaats (binnen-/buitenstedelijk), samen met de gevraagde energie per dag bepalende factoren zijn voor het type energievoorziening. In tegenstelling tot mobiele werktuigen zijn bouwlogistieke voertuigen juist minder afhankelijk van de aanwezige laad- en tankinfrastructuur op de bouwplaats zelf. Voertuigen kunnen bijvoorbeeld (in toenemende mate) gebruikmaken van de bestaande publieke tank- en laadinfrastructuur of op privaat terrein elders. In dit hoofdstuk wordt uiteengezet op welke locaties kan worden geladen. Aanvullend wordt uiteengezet welke opties voor energievoorziening het meest geschikt zijn waarbij rekening wordt gehouden met het beperken van bewegingen tussen de bouwplaats en laadlocatie.

- **Binnenstedelijk op de bouwplaats**

Binnenstedelijke bouwplaatsen liggen vaak in de buurt van het bestaande elektriciteitsnet (en soms zelfs in de buurt van bestaande laadvoorzieningen) waardoor een directe netaansluiting een interessante optie voor energievoorziening is, mits het gevraagde vermogen ter plaatse beschikbaar is. Daar komt bij dat de bouwwerkzaamheden op de bouwplaats vaak op één locatie plaatsvinden die weliswaar tijdelijk is, maar niet verplaatst, waardoor lokaal laden met behulp van een netaansluiting vaak mogelijk is.

De beschikbare netcapaciteit kan echter een beperkende factor zijn. Indien de vraag naar elektrisch vermogen (te) hoog is (vanwege een hoge energievraag, of vanwege beperkte capaciteit op het net), of de wachttijd op de netaansluiting te lang is, kan gedacht worden aan een combinatie met een batterij-container om de piek van energievraag te beperken. Voor binnenstedelijke projecten kan op bepaalde plekken gebruik worden gemaakt van bestaande aansluitingen (op de bouwplaats of in de directe omgeving van de bouwplaats) voor elektrische voertuigen en machines (bijvoorbeeld voor bronbemaling). Hierbij moet wel rekening gehouden worden met de veiligheid; voorbeeld hiervan is dat connectoren vergrendeld moeten zijn aan beide kanten van de aansluiting of dat er bijvoorbeeld hekken om het terrein heen moeten staan.

Het huidige energienetwerk in binnensteden is op dit moment niet vanzelfsprekend direct toereikend voor de steeds grotere energievraag vanuit bouwprojecten in binnensteden. Het laden van logistieke voertuigen op de bouwplaats maakt de uitdaging van energievoorziening op de bouwplaats groter door de extra energievraag en de onzekerheid in de planbaarheid van deze extra energievraag. Er zal vooraf goed nagedacht moeten worden over de logistieke inrichting van de bouwplaats en de locatie van de netaansluiting op de bouwplaats. Dit is nodig om opladen

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

9/43

van de batterij van de vrachtwagen te laten plaatsvinden tijdens het laden en lossen van bouwmaterialen. Aan de andere kant kan dit ook helpen om een gerealiseerde stroomvoorziening op de bouwplaats optimaal te benutten.

Voor bouwmachines die werken op waterstof dient de aanlevering daarvan nog geregeld te worden, net als een plek voor opslag van de waterstof. Dit levert voor veel bouwplaatsen in binnenstedelijke omgeving, waar de ruimte op de bouwplaats al een kritische factor speelt, een nog grotere uitdaging.

- **Buitenstedelijk op de bouwplaats**

Bij buitenstedelijke projecten, zoals bouwprojecten in de GWW, is de afstand tot het elektriciteitsnet vaker (niet altijd) een beperkende factor. Daarnaast maken bestaande structuren, waar aansluitingen bovenlangs, omheen of onderdoor moeten (zoals snelwegen of spoorlijnen) deze optie moeilijker en kostbaarder. Bovendien verplaatsen de werkzaamheden zich in sommige gevallen (bijvoorbeeld bij wegenbouw). Hierdoor moeten bouwmachines of accucontainers een bepaalde afstand overbruggen om bij de oplaadlocatie te komen.

Ook in buitengebieden kan de beschikbare netcapaciteit een beperkende factor zijn. Mogelijke alternatieve oplossingen voor afgelegen landelijke locaties zijn mobiele batterij- of waterstofcontainers, of waterstof-stroomaggregaten, al dan niet in combinatie met een netaansluiting met beperkte capaciteit. Ook kan er worden gewerkt met verwisselbare interne accupakketten (op de machine zelf) die geladen worden op alternatieve locaties buiten de bouwplaats. Net als bij binnenstedelijke locaties maakt het laden van logistieke voertuigen op de bouwplaats de uitdaging van energievoorziening op de bouwplaats nog groter door de extra energievraag en onvoorspelbaarheid daarvan. Ruimte speelt hierbij doorgaans een minder belangrijke rol.

- **Bouwhub/laadhub**

Een bouwhub is een locatie, vaak aan de rand van een stad, waar leveranciers bouwmaterialen leveren en van waaruit de materialen vervolgens geconsolideerd, just-in-time en met schone of emissievrije voertuigen naar bouwplaatsen wordt getransporteerd. De hub kan van één partij zijn, maar kan ook 'white label' functioneren, wat inhoudt dat alle bouwers, toeleveranciers en partijen er gebruik van mogen maken. Naast eerder genoemde functionaliteiten kan de bouwhub ook worden gebruikt als een locatie om oplaadmogelijkheden te bieden voor elektrische logistieke voertuigen. Zo kunnen voertuigen bijvoorbeeld opgeladen worden tijdens het laden/lossen van materialen. Daarnaast is het ook een locatie waar in de transitie naar zero-emissie stadslogistiek ont koppeling kan plaatsvinden van conventionele naar uitstootvrije voertuigen.

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

10/43

De energievoorziening op een hub kan bij voorkeur worden geregeld met een permanente directe netaansluiting. De hub kan ook als centrale opslag- en laadlocatie dienen van verwisselbare accupakketten of als vulpunt van waterstofcontainers. Bij dat laatste moet wel rekening worden gehouden met veiligheidscontouren. Daarnaast dient rekening gehouden te worden met de eventuele emissies die plaatsvinden bij de hub zelf.

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

11/43

- **Private infrastructuur**

Laadmogelijkheden op het terrein van een bedrijf (kan ook een derde partij zijn, met overcapaciteit en laadmogelijkheden) of thuis bij de werknemer zullen doorgaans worden voorzien van een permanente directe netaansluiting. Met private infrastructuur hebben leveranciers/vervoerders zekerheid dat er voldoende beschikbaarheid is van laadmogelijkheden voor hun voertuigvloot, mits het gewenste laadvermogen gerealiseerd kan worden. Daarnaast zijn de stroomkosten lager dan bij publieke laadpunten.

Met name 'overnight charging' zal naar verwachting gunstig zijn in energieprijzen en heeft de minste impact op de logistieke operatie (minder last van laadtijden). In afstemming kan de infrastructuur ook gebruikt worden door andere logistieke partijen (gastgebruik) [2]. Deze constructie is echter voor de meeste mobiele werktuigen geen mogelijkheid, gezien deze doorgaans op de bouwplaats blijven (tenzij ze beschikken over een verwisselbare interne accu en deze accu's worden opgeladen aan private laadinfrastructuur elders).

- **Publieke tank- en laadinfrastructuur**

Dit zijn oplaadmogelijkheden op openbaar terrein, bijvoorbeeld bij tankstations, laadpleinen, op parkeerplaatsen langs snelwegen of op industrieterreinen. Deze oplaadpunten zijn voor iedereen toegankelijk en meestal voorzien van een directe netaansluiting.

Bij voldoende beschikbaarheid van oplaadmogelijkheden biedt het gebruik van publieke laadpunten meer flexibiliteit in de logistieke planning doordat de afhankelijkheid van het laadpunt op de thuisbasis afneemt. De nadelen voor logistieke partijen zijn echter dat er geen garantie is dat het oplaadpunt beschikbaar is en dat de stroomkosten vaak hoger zijn.

Daarnaast geldt op dit moment nog dat publieke infrastructuur vaak niet geschikt is voor zwaardere voertuigen en mobiele werktuigen. Hier wordt wel op Europees niveau aan gewerkt. In verschillende pilotprojecten wordt wel onderzoek gedaan naar de inzet van reserveringssystemen voor openbare snellaadpleinen, zoals in het DKTI-project FLEX EV [3]. Indien er een bouwplaats dicht bij een publiek laadpunt is, zou dat onder bepaalde voorwaarden deels toegepast kunnen worden als energievoorziening op de bouwplaats. De bruikbaarheid van deze optie is echter beperkt tot de machines die de openbare weg op mogen.

2.3 Vergelijking van laadmogelijkheden

In deze paragraaf wordt ingegaan op de milieu-impact, kosten, toepasbaarheid en veiligheid van de verschillende laad- en tankmogelijkheden.

Milieu-impact

De opties in deze notitie voor het laden van uitstootvrij materieel zijn bijna allemaal lokaal uitstootvrij. Alleen bij de optie waarin waterstof in een verbrandingsmotor (in een stroomaggregaat) wordt toegepast, komen luchtverontreinigende emissies zoals NO_x en fijnstof vrij. Bij gebruik van waterstofdragers, zoals hydrazine, komt er CO₂ vrij uit de reformer, deze kan onder voorwaarden als nul tellen. Emissies die plaatsvinden omdat er extra vervoerbewegingen nodig zijn voor diverse opties worden verderop in deze paragraaf toegelicht.

Afhankelijk van de emissies die gepaard gaan met de energieopwekking, kunnen er bij uitstootvrije voer-/ werktuigen wel ketenemissies optreden. Om de ketenemissies zoveel mogelijk te reduceren is het daarom ook van belang dat er voldoende duurzame elektriciteit en duurzame waterstof beschikbaar komt. De beschikbaarheid van voldoende groene stroom of groene waterstof is niet vanzelfsprekend. De vraag naar groene stroom en groene waterstof neemt ook toe in andere sectoren (ook buiten de transportsector).

De opties verschillen echter ook qua energie-efficiëntie. Een directe netaansluiting is de meest efficiënte oplossing (laagste energieverliezen) voor de benodigde energiebehoefte op de bouwplaats. Over de gehele keten gezien is het totale energierendement van accu/kabel-elektrisch aangedreven werk- en voertuigen hoger (ordegrootte 2-3x)¹¹, dan bij waterstof-aangedreven werktuigen.

Milieu-impact door benodigde transportbewegingen

Voor de opties die resulteren in een toename van transportbewegingen vanwege het vervoeren van waterstofcontainers, batterijcontainers en/of verwisselbare accu's, is de impact door emissies van het transportmiddel ook van belang. In tabel 12 staat een rekenvoorbeeld ter indicatie van de impact op CO₂-uitstoot ten gevolge van de extra vervoersbewegingen. Het is waarschijnlijk dat in de praktijk de transportafstand van waterstof in de meeste gevallen langer is dan voor verwisselbare accu's. Er is uitgegaan van transport met een dieseltruck met een gebruik van 30 liter diesel per 100km. Als het transport plaatsvindt met emissieloze trucks wordt de milieu impact van het transport vermeden (bij gebruik van groene stroom/waterstof).

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

12/43

¹¹ Verhouding is afhankelijk van verschillende factoren, onder andere; de productiemethode & productielocatie (in verband met transport) van waterstof, het , laadvermogens & toepassing en de rendementen van de aandrijflijnen.

Tabel 1: CO₂-impact van vervoersbewegingen voor leveringen van waterstof of batterijpakketten bij de case studie: nieuwbouwwijk. De percentages geven de bijdrage ten opzichte van de totale uitstoot door mobiele werktuigen van het referentieproject weer (bij gebruik van dieselmaterieel).

Datum
14 juli 2022

Onze referentie
TNO-2022-NOT-100345396

Blad
13/43

	2x 25km	2x 50km
Liter diesel per levering	15 liter	30 liter
kgCO ₂ per levering	39	78
CO ₂ -uitstoot bij 550 leveringen van 1 MWh batterijpakketten	21 ton (5%)	42 ton (10%)
CO ₂ -uitstoot bij 275 leveringen van 2 MWh batterijpakketten	10 ton (3%)	21 ton (5%)
CO ₂ -uitstoot bij 134 leveringen van 200 kg waterstof	5,2 ton (1,4%)	10,4 ton (3%)
CO ₂ -uitstoot bij 27 leveringen van 1000 kg waterstof ¹²	1,3 ton (0,3%)	2,1 ton (0,6%)

Toelichting bij Tabel 1:

- In de casestudie over de “grote bouwplaats binnenstedelijk” voor mobiele werktuigen is berekend dat er ca. 550 containers van 1MWh nodig zijn voor volledige elektrificatie door middel van mobiele accucontainers.
- Als per trucklevering één batterijcontainer kan worden geleverd, staat dit gelijk aan 21-42 ton CO₂, bij een afstand van 2x25km of 2x50km.

Ter referentie, in de casestudie is een CO₂-emissie van 360 ton berekend voor de inzet van conventionele bouwmachines tijdens de gehele duur van het project. Bij inzet van emissieloze bouwmachines wordt dan grofweg 5%-10% van de behaalde CO₂-reductie teniet gedaan vanwege het transport van accu's (wanneer dit met diesel trucks plaatsvindt).

In het geval van waterstof zijn er minder transportbewegingen nodig. Een truck met een capaciteit van 400 kg waterstof bevat ruim 13 MWh aan energie en 1.000 kg waterstof bevat ca. 33 MWh aan energie. Ondanks de hogere energie-efficiency van de elektrische aandrijflijnen (hier ca. 80% voor elektrisch vs. ca. 50% voor waterstof) zijn er toch meer vervoersbewegingen voor het transport van accu's nodig vanwege de lagere energiedichtheid van accupakketten ten opzichte van waterstof.

Voor het transport van diesel zijn uiteraard ook vervoersbewegingen noodzakelijk. Diesel heeft echter een veel hogere energiedichtheid dan waterstof waardoor er per levering meer energie kan worden vervoerd. Een dieseltanker bevat minstens

¹² Momenteel nog niet gangbaar.

30.000 liter diesel waardoor per trip negen keer zoveel energie kan worden vervoerd in vergelijking met 1000 kg waterstof.

Kosten

De extra kosten van alternatieve laad- en tankinfrastructuur zijn op dit moment moeilijk in te schatten. Dat heeft er in de eerste plaats mee te maken dat de technieken nog niet eerder op grote schaal zijn toegepast. In de tweede plaats zijn de kosten van de verschillende opties zeer afhankelijk van de energievraag, de vermogensvraag, de duur van het project en de locatie van het bouwproject.

Hieronder volgt een aantal kwalitatieve overwegingen die in toekomstige kostenonderzoeken kunnen worden meegenomen:

- De aard van de bouwwerkzaamheden is zeer bepalend voor de kosten. Wanneer bijvoorbeeld een nieuwbouwwijk wordt gebouwd dan zal er een permanente stroomvoorziening worden gerealiseerd. Door deze stroomvoorziening vroeg in het bouwproces in te richten kan de bouwlocatie hier gebruik van maken. Dit leidt tot lagere aansluitkosten.
- Bouwstroom is niet voor elke bouwlocatie een mogelijkheid. Als er geen aansluiting op het netwerk mogelijk is, moeten de andere opties overwogen worden met bijbehorend kostenplaatje, wat doorgaans duurder is dan een vaste aansluiting op het netwerk.
- Daar waar wel gebruik kan worden gemaakt van een vaste aansluiting op het netwerk is de stroomprijs afhankelijk van de complexiteit en vermogensvraag vanuit het bouwproces, wat afhankelijk is van de aard en het gebruik van de aansluiting.
- De kosten van waterstof zijn nog onzeker, met name voor de toekomst ten behoeve van energievoorziening op de bouwplaats. Voor personenauto's zijn de kosten voor het tanken van waterstof momenteel ca. 10 euro per kg¹³.
- Indien de stroomprijs of waterstof prijs te hoog wordt, worden de additionele investeringskosten van elektrische machines niet terugverdiend. Dit punt wordt hieronder verder toegelicht.

Over het algemeen zijn waterstof- en accu-elektrische werktuigen duurder dan de traditionele dieselmachines. Op dit moment kan de aanschafprijs van elektrische machines 2x tot 3x hoger liggen dan van een vergelijkbare dieselmachine. Wel wordt verwacht dat de hoge investeringskosten in de toekomst dalen, als gevolg van bijvoorbeeld dalende batterijprijzen. De hogere investeringskosten terugverdienen is mogelijk wanneer de operationele kosten lager zijn dan voor equivalente dieselmachines.

Uit een versimpeld rekenvoorbeeld¹⁴, ter indicatie, kan bijvoorbeeld worden opgemaakt hoe hoog de energieprijzen van een alternatieve energie maximaal kan

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

14/43

¹³ <https://waterstof-tanken.nu/waterstof-tanken/>

¹⁴ In deze voorbeeldberekeningen is alleen rekening gehouden met het energiegebruik en de meerkosten in aanschafprijs. Verschillen in andere operationele kosten zoals verzekeringen of onderhoud zijn hier niet in meegenomen.

zijn om binnen een periode van tien jaar de meerprijs van een zero-emissie werktuig terug te verdienen.

- Om een meerprijs van bijvoorbeeld € 50.000 euro terug te verdienen in tien jaar tijd, moeten de operationele kosten minimaal € 5.000 per jaar lager zijn dan bij het gebruik van dieselwerktuigen.
- Bij een diesilverbruik van gemiddeld 8.000 liter per jaar (200 dagen x 40 liter per dag)¹⁵ komen, uitgaande van een vaste dieselprijs van €1,35 per liter, de operationele kosten uit op €10.800 per jaar.
- De maximale energiekosten van een alternatieve elektrische graafmachine of waterstof-graafmachine moeten bij gelijke economische levensduur dan per jaar €5.800 lager zijn dan voor een vergelijkbare conventionele machine.
- Uitgaande van dezelfde aannames rondom aandrijflijnefficiëntie als gepresenteerd in de case studies, zou voor een vergelijkbare inzet circa 33 MWh aan elektriciteit nodig zijn of 1.600 kg waterstof per jaar.
- Dat resulteert in een maximale stroomprijs van circa 0,17 €/kWh of een maximale waterstof prijs van 3,60 €/kg.

Een netto stroomprijs van 0,17 €/kWh is hoger dan het gangbare tarief voor een normale bouwstroomaansluiting. De vermogensvraag voor een 'elektrische bouwplaats' wordt nu echter hoger dan een voor een standaard bouwaansluiting gebruikelijk is. Daarnaast zijn laadvoorzieningen benodigd en kan de inzet van accucontainers noodzakelijk zijn. Hierdoor kan de stroomprijs hoger worden dan nu gebruikelijk is.

Snelheid van implementatie, marktrijpheid & toepasbaarheid

Voor alle opties van energievoorziening geldt dat er al praktijkvoorbeelden bestaan, al dan niet met een andere toepassing dan in de bouw. De snelheid van implementatie van alle opties hangt in grote mate af van de snelheid van de ontwikkeling van het aanbod van nul-emissie werk- en voertuigen en de snelheid van opschaling van de laadinfrastructuur, met name het energienetwerk. Ervaringen opdoen met eerste innovaties op het gebied van nul-emissie mobiele werktuigen, bouwlogistieke voertuigen en bijbehorende laadinfrastructuur, leidt tot meer inzicht en uiteindelijk tot een snellere adaptatie in de operationele omgeving. Daarbij is onderzoek naar de optimale laadstrategie in relatie tot operationele inzet een cruciaal aspect. Projecten, zoals DKTi FLEX EV en DKTi VERZET, zijn praktische voorbeelden daarvan [3].

De directe netaansluiting is op dit moment al een gangbare optie. Al kost het soms maanden om de netaansluiting te realiseren en is de vermogensvraag nu doorgaans lager dan wanneer al het materieel uitstootvrij zou zijn. Zoals in paragraaf 2.1 al aangegeven, komt het bestaande elektriciteitsnetwerk echter steeds meer onder druk te staan door enerzijds de toenemende energievraag en anderzijds het toenemende aanbod van (fluctuerende) duurzaam opgewekte stroom. Netbeheerders geven nadrukkelijk de behoefte aan voor nieuwe wet- en

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

15/43

¹⁵ Vergelijkbaar met de 40kW graafmachine uit de eerste case-studie (zie pag. 24, casestudie 1 Klein binnenstedelijk project: rioolwerkzaamheden en herbestrating).

regelgeving, om vraag en aanbod van elektriciteit beter op elkaar af te kunnen stemmen en om beter te kunnen anticiperen op de verwachte vraag in de toekomst¹⁶. Mogelijk zorgt dit wel voor een versnelde implementatie van alternatieve opties zoals mobiele batterijcontainers. Daarnaast zijn de ontwikkelingen op het gebied van 'smart charging' van belang om het stroomnet optimaal te benutten.

Impact op infrastructuur & veiligheid

De plaatsing van laad- en tankinfrastructuur voor nul-emissie werk- en voertuigen brengt nieuwe risico's met zich mee op het gebied van veiligheid en vereist nieuwe richtlijnen om die risico's te beperken. De bouwplaats is een ruige omgeving die zware veiligheidseisen stelt aan het werk dat daar verricht wordt. Beschadiging van de laad- en tankinfrastructuur leidt tot veiligheidsrisico's voor de directe omgeving. Bij plaatsing van laad- en tankinfrastructuur op de bouwplaats moet rekening worden gehouden met de voorschriften voor omgaan met hoge vermogens, met de impact van weer en met andere omgevingsfactoren.

Bij brandveiligheid moet gedacht worden aan de locatie waar laad- en tankinfrastructuur wordt geplaatst (bijvoorbeeld niet te dicht tegen gebouwen, geen blokkades van vluchtroutes en nooduitgangen), het laten plaatsen van voorzieningen door erkende installateurs en het aanbrengen van een aanrijbeveiliging.

Een toename van het aantal vervoersbewegingen, doordat mobiele werktuigen zich regelmatig moeten verplaatsen naar en van oplaadpunten, vergroot het risico op aanrijdingen of andere ongevallen.

Buiten de bouwplaats wordt het locatievraagstuk voor de plaatsing van openbare laad- en tankinfrastructuur voor elektrisch vrachtvervoer een onderwerp van studie. Wat zijn de beste strategische locaties voor openbare laadpleinen voor opladen elektrische vrachtwagens? En hoe kunnen deze worden ingepast in de elektriciteitsinfrastructuur?

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

16/43

¹⁶ <https://nos.nl/artikel/2387262-noodwet-nodig-om-problemen-op-stroomnet-te-voorkomen>

3. Spoorwerk- en vaartuigen

3.1 Opties en locaties voor laad- en tankinfrastructuur van spoorwerktuigen

Om toekomstige uitstootvrije spoorwerktuigen te voorzien van energie zijn de opties zoals behandeld in hoofdstuk 2 ook van toepassing. Aanvullend is er voor de energievoorziening van spoorwerktuigen echter in potentie de mogelijkheid om een aansluiting te maken op het ProRail-netwerk. Voor de aansluiting op het ProRail-netwerk zijn verschillende mogelijkheden in kaart gebracht door ProRail:

1. Aansluiting bij een voedingsgebouw

Die zijn bij geëlektrificeerde baanvakken voorhanden op afstanden van 5 – 10 km. Eventueel kan een tijdelijke kabel naar de bouwplaats worden aangelegd, of het materieel moet er naartoe rijden om opgeladen te worden.

2. Aansluiting bij een wisselverwarmingsinstallatie (of op de bekabeling daarvan)

Daar waar wissels liggen is er ook een wisselverwarmingsinstallatie. Die heeft vaak voldoende vermogen over om te kunnen dienen als oplaadpunt. De afstand tot de bouwplaats kan ook hier groot zijn.

3. Aansluiting op het toekomstige 10kV-voedingssysteem

Het huidige 3kV 75Hz systeem en de elektrische nutsaansluitingen zullen op termijn worden vervangen door een landelijk 10kV Energie Distributie Systeem (EDS). Het systeem ligt er al langs de Betuweroute en op een paar plaatsen bij Amsterdam en Rotterdam. Ambitie is om uiteindelijk het gehele ProRail-netwerk uit te rusten met dit systeem. Laainfrastructuur voor materieel kan aan dit systeem worden aangesloten.

4. Afname op de bouwplaats met een stroomafnemer

Materieel dat op het spoor rijdt (bijv. een krol of werktrein) zou kunnen worden voorzien van stroom d.m.v. een stroomafnemer. Niet voor alle werkzaamheden wordt deze optie als realistisch beschouwd, omdat spanning op de bovenleiding tijdens bouwwerkzaamheden gevaren met zich meebrengt en/of beperkingen stelt. Toch zijn er mogelijk bepaalde type werkzaamheden waarbij dit wel een optie kan zijn.

5. Opladen via een stroomafnemer

Dit vereist dat het materieel heen en weer rijdt naar een locatie nabij de bouwplaats die niet spanningsloos is, waar contact wordt gemaakt met de bovenleiding. Ook is het denkbaar om verwisselbare accupakketten of een accuwagen op deze manier op te laden.

Qua bouwlocaties is er - net als voor reguliere bouwactiviteiten - een grote diversiteit, van binnenstedelijke tot afgelegen buitenstedelijke locaties. Vanwege de aanwezigheid van het ProRail-netwerk heeft de locatie in potentie echter een minder grote invloed op de energievoorziening dan bij reguliere bouwwerkzaamheden. Net als bij reguliere bouwprojecten kennen bouwplaatsen aan of nabij het spoor ook een grote diversiteit aan werkzaamheden. Zo zijn er bijvoorbeeld werkzaamheden aan het spoor (ballast, dwarsliggers, spoorstaven, bovenleidingen, treinbeveiliging), maar bijvoorbeeld ook grote werkzaamheden

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

17/43

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

18/43

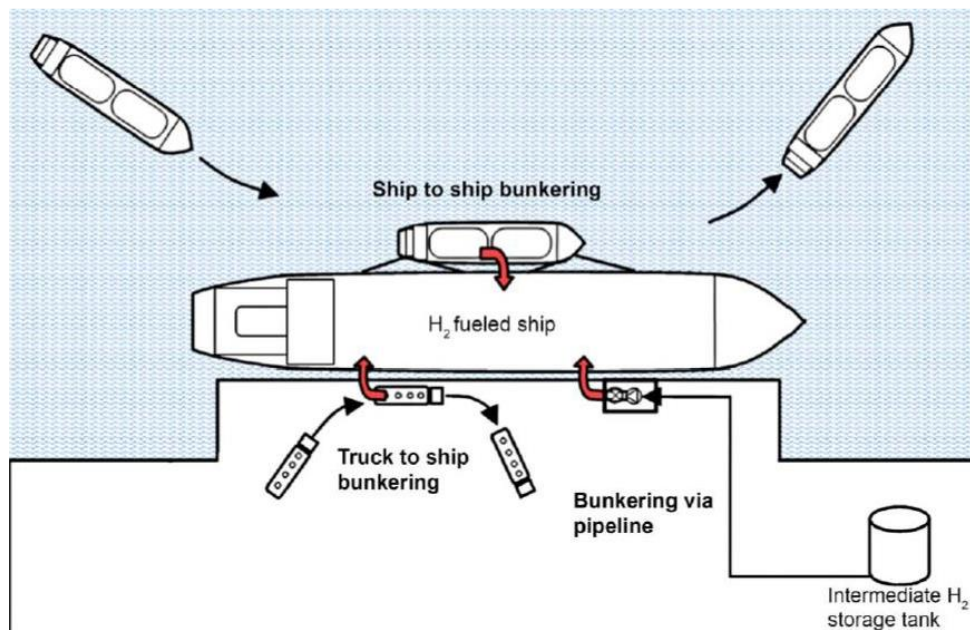
rondom het spoor, zoals de aanleg van kunstwerken (waaronder tunnels) en stations. Het toegepaste materieel – en daarmee de vermogensvraag en energiebehoefte – kan hierbij flink uiteenlopen. Ook de duur van de projecten verschilt sterk. Zo zullen spoorwerkzaamheden (waarvoor een buitendienststelling nodig is) vaak een korte doorlooptijd per locatie hebben, vooral in vergelijking met grote werkzaamheden rondom het spoor. Voor de laatste loont het sneller om te investeren in een specifieke laadvoorziening voor het betreffende project. Doordat laadvoorzieningen voor spoorwerkzaamheden voor een kortere duur benodigd zijn, is daar een meer praktische en flexibele oplossing benodigd om de bouwplaats van energie te voorzien.

3.2 Opties en locaties voor laad- en tankinfrastructuur van vaartuigen die worden ingezet in de waterbouw

Voor het bunkeren van energiedragers voor vaartuigen zijn er vier voorname mogelijkheden:

- Truck-to-ship: Bevoorraden via tanktrucks
- Shore-to-ship: Bevoorraden vanuit een vaste (of tijdelijke) wallocatie
- Ship-to-ship: Bevoorrading via schip-naar-schip overslag
- Overslag van mobiele containers of tanks

Onderstaande figuur geeft schematisch de verschillende bunkermogelijkheden weer, in dit geval voor waterstof, maar ook toepasbaar voor andere brandstoffen. Voor zeevaart is ship-to-ship bunkering gangbaar voor het huidige bunkeren van MGO, HFO en LNG. Voor binnenvaart is dit een combinatie van ship-to-ship en shore-to-ship.



Figuur 6: Schematische weergave van verschillende bunkermogelijkheden in de scheepvaart Bron: DNV [4]

Biobrandstoffen en (bio-)LNG

Voor dieselvarianten (biodiesels, e-diesel) zijn in Nederlandse havens afdoende bunkermogelijkheden beschikbaar. Voor LNG zijn afdoende bunkermogelijkheden aanwezig in de zeehavens. Deze bestaande infrastructuur kan ook voor biobrandstoffen worden gebruikt. Hier worden geen verdere ontwikkelingen gezien.

Elektrische laadinfrastructuur

Bij het gebruik van plug-in hybride of volledig-elektrische aandrijving zullen op de wal infrastructuurvoorzieningen dienen te worden ontwikkeld. Voor het elektrisch laden van schepen zijn verschillende opties mogelijk, afhankelijk van het technische en operationeel profiel. Belangrijk hierbij is in welke mate een laadverbinding met hoog vermogen nodig is en wat het laadschema is (hoeveel tijd is beschikbaar tussen verschillende diensten en is het bijvoorbeeld mogelijk om tijdens diensten tussendoor bij te laden) [5].

Bij elektrische stationaire waterbouwvaartuigen (stationaire zandzuigers) kan energie worden voorzien met een permanente stroomkabel vanaf de wal. Walstroomaansluiting met groene stroom is hier een goede methode voor verduurzaming (**directe netaansluiting**). De vermogensvraag van deze machines is erg groot (3000 kW) voor het huidige elektriciteitsnet. Voor vermogens boven 300 kW en tot 3 MW is aansluiting op het middenspanningsnet (ofwel een A.3 aansluiting op 10 kV/MS) nodig. Aansluitkosten zijn afhankelijk van aansluitcapaciteit en afstand tot het elektriciteitsnet.

Een alternatieve oplossing voor het opladen van batterij-elektrische schepen kan het gebruik van mobiele batterijcontainers zijn die op de wal geplaatst worden in combinatie met een laadinterface (zie paragraaf 2.1). Dit zou bijvoorbeeld mogelijk kunnen zijn voor (werk)motoren van kleine schepen (cutter-zuigers, peilboten, kleine werkschepen) die voor langere tijd op één traject worden ingezet.

Een derde mogelijkheid is inzet van **verwisselbare accu's** of **accucontainers**. Wisselbare accu's zijn een mogelijkheid voor zeer klein materieel, zoals schuifboten of op duwbakken voor het bedienen van de lieren. Accucontainers in 20ft containers worden momenteel ontwikkeld om in te zetten in de binnenvaart. Dit vereist echter specifieke equipment (containerkraan) die alleen voorhanden is in havengebieden. Bovendien zal dit waarschijnlijk niet passen op het dek van de meeste werkschepen.

Een laatste mogelijkheid om vanaf de kant te laden is via de huidige walstroominfrastructuur (internationaal aangeduid als Onshore Power Supply) in havens. Dit is alleen mogelijk voor het laden van schepen met zeer lage vermogens of voor het voorzien van stroom aan de hulpmotoren in de havengebieden. Momenteel is walstroom voor de zoete vloot al gangbaar in de meeste binnenhavens. Ook voor zeescheepvaart moet in de komende jaren walstroom beschikbaar worden gesteld in de belangrijkste havens. Dit is in eerste instantie alleen om container- en passagiersschepen te bedienen. De havens van

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

19/43

Rotterdam en Amsterdam werken momenteel plannen uit voor de uitrol van walstroom voor zeeschepen.

Datum
14 juli 2022

Onze referentie
TNO-2022-NOT-100345396

Blad
20/43

Waterstof

Bunkereren van waterstof kan op alle vier de benoemde wijzen (truck-to-ship, ship-to-ship, shore-to-ship en het wisselen van tankcontainers). De wijze van bunkereren is afhankelijk van de vorm waarin waterstof gebruikt wordt aan boord (vloeibaar of gas onder druk) en de bunkerhoeveelheden. In het project RH2INE zijn verschillende voor- en nadelen van de verschillende opties benoemd (zie onderstaande tabel).

*Tabel 2: Voor- en nadelen van verschillende manieren voor het bunkereren van waterstof
Bron: DNV [4]*

	TTS	STS	Bunker station	Swappable tank-containers
Typical volumes	50 - 100 Nm ³	100 – 1000 Nm ³	All volumes	20 – 40 Nm ³ per tank
Pro's	<ul style="list-style-type: none"> • Flexible • No infrastructure required: low investment, quick start-up 	<ul style="list-style-type: none"> • Short bunker times for liquids (high rates) • Could be done in parallel with cargo operations (if risk is acceptable): short turnaround times • Vessels do not have to sail to dedicated bunker location: short turnaround times • Flexibility in locations and volumes 	<ul style="list-style-type: none"> • Short bunker times (high rates) • Flexibility in volumes • Scalable with limited additional investment 	<ul style="list-style-type: none"> • Simplified distribution via e.g. container terminals • No infrastructure required: low investment, quick start-up • Short "bunker" times • Vessels do not have to sail to dedicated bunker location: short turnaround times • Modularity & flexibility towards future adaptations or adoption of (other) alternative fuels
Con's	<ul style="list-style-type: none"> • Low bunker rates/ long bunker time • Low capacity • Relatively high transportation cost per m³ • Presence of truck on quay might restrict SIMOPS 	<ul style="list-style-type: none"> • High investment and operating costs • Additional threats due to ship motions and ship collisions 	<ul style="list-style-type: none"> • Vessels have to sail to a dedicated bunker location before/after cargo operations: longer turnaround times • High investment costs (in case of fixed installation) • Occupation of port space (in case of fixed installation) 	<ul style="list-style-type: none"> • Low capacity (requires more frequent bunkering) • Occupation of cargo space on-board the ship • Requires multi-modal infrastructure • Relatively high transportation cost per m³
Typical application	<ul style="list-style-type: none"> • Low frequency bunkering locations • Early stage bunkering • Different assigned bunkering areas (e.g. public quays or at terminals) • Remote locations 	<ul style="list-style-type: none"> • Seaports with mix of inland and seagoing ships. • Smaller barges for high demand areas (if found to be profitable) 	<ul style="list-style-type: none"> • High frequency bunkering locations with stable and high demand 	<ul style="list-style-type: none"> • Early stage bunkering • Container vessels and cargo vessels • Could be combined with bunker station in future • Bunker location: container terminals

Het RH2INE consortium ziet de volgende fasering in de uitrol:

- Korte termijn (1-5 jaar): omwisselen van containers met gasvormige waterstof onder druk. Zij zien dit met name als optie voor containerschepen, omdat deze gebruik kunnen maken van bestaande infrastructuur. In pilots wordt hier al reeds mee geëxperimenteerd (bijvoorbeeld in het DKTI project Proeftuin Waterstof-Elektrische Binnenvaart Bouwtransport in Amsterdam).
- Middellange termijn (5-10 jaar): bunkereren van vloeibare waterstof. De ontwikkeling hiervan is afhankelijk van technologieontwikkeling in productie van vloeibare waterstof en de mate waarin dit compact en veilig aan boord kan worden opgeslagen. Een zelfde introductiepad wordt gezien als bij LNG (initieel truck-to-ship en later via bunkerschepen en vaste tankpunten in zeehavens).

- Lange termijn (10-20 jaar): bunkeren van waterstofdragers (LOHC, natriumboorhydride, methanol, ammoniak) in combinatie met een brandstofcel.

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

21/43

Andere alternatieve energiedragers

Ook voor bunkeren van mogelijke andere energiedragers zoals methanol of ammoniak bestaan verschillende mogelijkheden:

- Bevoorrading via tank trucks (truck-to-ship): deze optie is geschikt voor een opstart/pilotfase of bij kleine bunkerhoeveelheden (bevoorrading van 1 of 2 schepen). Gebruik van tanktrucks is aantrekkelijk in een eerste opstartfase (bijvoorbeeld een pilotproject) of als schepen veelvuldig op verschillende locaties worden ingezet (dit zou bijvoorbeeld kunnen gelden voor waterbouwschepen die in verschillende gebieden worden ingezet).
- Opslag in een lokale opslagtank (shore-to-ship): deze tank kan afhankelijk van de grootte bevoorrad worden via een binnenvaartschip of (meerdere) truck(s). Lokale tanks zijn geschikte opties voor het bunkeren van grotere hoeveelheden, bijvoorbeeld voor het bevoorraden van meerdere schepen in kleine havens. Mogelijk is deze optie ook interessant voor offshore, aangezien zij een vaste locatie hebben.
- Bevoorrading via schip naar schip overslag (ship-to-ship). Deze optie is met name geschikt bij een meer volwassen markt met meerdere gebruikers, en zal met name plaats vinden in de grotere zeehavens. Een eerste optie is om in een bestaand bunkerschip één van de tanks om te bouwen naar een nieuwe energiedrager of gebruik te maken van een (omgebouwde) (chemicaliën)tanker. In een eerste methanol-bunkerpilot in Rotterdam in mei 2021 werd bijvoorbeeld gebruik gemaakt van een binnenvaartschip dat regulier methanol naar het achterland vervoert. Grootschalige acceptatie zou leiden tot een capaciteitsuitbreiding van de bunkervloot in havens, zowel in aantal (vanwege hogere bunkerfrequentie van zeeschepen) als in grootte (vanwege grotere bunkervolumes).

Veiligheidsaspecten voor bunkeren

Er zijn verschillende veiligheidsaspecten waar rekening mee moet worden gehouden bij het bunkeren van alternatieve energiedragers voor waterbouw.

Beperking van risico's wordt geregeld middels specifieke veiligheidsrichtlijnen.

Belangrijke punten in de uitwerking betreffen brand- en explosiegevaar, toxiciteit en milieuschade.

- Voor dieselvarianten (bio- en e-diesel) en LNG zijn de effecten op veiligheid bekend en zijn veiligheidsrichtlijnen reeds voldoende ontwikkeld voor zowel de zeevaart als de binnenvaart.
- Ook voor opladen en gebruik van batterij-elektrische schepen zijn reeds veel richtlijnen beschikbaar. Aan de scheepszijde hebben klassebureaus regulering ontwikkeld voor typegoedkeuring. Ook voor het bunkeren zijn standaarden en regelgeving ontwikkeld (IEC IEC/ISO/IEEE 80005-3, IEC IEC/ISO/IEEE 80005-1 en IFC 608).
- Voor andere alternatieve energiedragers (zoals waterstof, methanol en ammoniak) zijn standaarden nog in ontwikkeling. Wel is er veel kennis beschikbaar vanuit de recente ervaring met LNG als scheepsbrandstof

voor het inrichten van het veiligheidsproces, waarbij de methode van equivalente veiligheid kan worden gebruikt (SOLAS regulation II-1/55). IGF (veiligheidscode van IMO voor schepen die varen op gassen of brandstoffen met een laag vlampunt) geeft richtlijnen voor bunkeroperaties aan de scheepszijde voor de zeevaart. Momenteel worden de veiligheidsaspecten voor alternatieve brandstoffen in meerdere nationale en Europese projecten in kaart gebracht (bijvoorbeeld voor methanol in de projecten Green Maritime Methanol, MENENS en FASTWATER, voor waterstof in de projecten RH2INE en SH2IPDRIVE en voor ammoniak in het project MAGPIE).

- Aan de infrastructuurzijde dient case-by-case samen met omgevingsdiensten in kaart te worden gebracht wat de minimale benodigde afstanden zijn. Op pilotbasis wordt hier reeds ervaring mee opgedaan. In Europese werkgroepen worden veiligheidsstandaarden aan de infrastructuurzijde verder uitgewerkt.

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

22/43

4. Case-studies

In dit hoofdstuk is de energievraag voor de inzet van mobiele werktuigen op de bouwplaats van drie verschillende (fictieve maar representatieve) bouwprojecten berekend. Deze berekeningen aan bouwplaatsen zijn afgestemd met een marktpartij. Een methode voor het bepalen van de energievraag voor mobiele werktuigen en drie use-cases zijn in sectie 4.1 beschreven. De energievraag van bouwlogistieke wegvoertuigen is in sectie 4.2 behandeld, in sectie 4.3 en 4.4 volgen respectievelijk spoorwerktuigen & waterbouw. Het doel van de casestudies is om een inschatting te maken van de omvang van de benodigde energievoorzieningen.

4.1 Mobiele werktuigen

In deze paragraaf worden drie verschillende casestudies behandeld om de energievraag van een volledig uitstootvrij bouwproject in kaart te brengen.

De bouwplaatsprofielen die worden uitgewerkt zijn:

- rioolwerkzaamheden en herbestrating;
- bouwrijp maken van een nieuwbouwwijk;
- snelwegverbreding.

Methode

Voor de bepaling van de benodigde laad- en tankinfrastructuur is per conventioneel machinetype een berekening gemaakt op basis van motorvermogen, gemiddeld belastingprofiel, en inzet per dag. De uitkomst is het dieselverbruik en de geleverde nuttige (mechanische) energie van een werktuig per dag. Met behulp van aannames ten aanzien van efficiëntie van alternatieve aandrijfliijnen is de benodigde elektrische en waterstofenergie berekend voor de ZE-variant van hetzelfde machinetype. Daarbij wordt uitgegaan van dezelfde inzet als bij de dieselmachines. In de toekomst kunnen inzetprofielen van alternatieve technologieën mogelijk veranderen. De energiebehoefte is vertaald naar de benodigde netaansluiting, het aantal benodigde accucontainers of de hoeveelheid waterstof per week.

Aannames

De benodigde energievraag is het uitgangspunt voor de behoefte aan waterstof en elektriciteit. De volgende kengetallen zijn gebruikt in de analyse van de casestudies.

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

23/43

Datum
14 juli 2022

Onze referentie
TNO-2022-NOT-100345396

Blad
24/43

Tabel 3: Kengetallen zoals gebruikt in de case studie voor mobiele werktuigen.

	Eenheid	Kengetal
Energie waterstof	kWh/kg	33,6
Beschikbare laadtijd 's nachts	Uren	12
Flexibiliteitsmarge op de capaciteitsvraag	%	25
Capaciteit accucontainer	kWh	1.000
Capaciteit waterstofcontainer	kg	400

Verwisselbare interne accu's van machines zijn niet expliciet genoemd in deze casestudie. Als de verwisselbare pakketten op de bouwplaats worden geladen is het benodigde vermogen 's nachts lager maar kan dat overdag hoger zijn, afhankelijk van de laadstrategie. De aanname is dat een werktuig met alternatieve aandrijving dezelfde hoeveelheid arbeid moet leveren om dezelfde taken uit te voeren. In deze studie zijn de volgende aannames gedaan voor typische energieverliezen¹⁷:

- Verliezen accu-elektrische aandrijving (TTW): 10%
- Laadverliezen: 10%
- Waterstof i.c.m. brandstofcel (FCEV) aandrijving (TTW): 50%

Kabel-elektrische werktuigen (direct op het net aangesloten) hebben de minste verliezen en zijn daardoor het meest energie efficiënt. Daarnaast is er een extra marge van 25% toegevoegd aan de berekeningen op de benodigde energie. Deze kan nodig zijn wanneer een machine op een dag meer energie nodig heeft dan gemiddeld en geeft daarmee extra flexibiliteit. Ook is ervan uitgegaan dat de accucapaciteit van de machines groot genoeg is om in de dagelijkse energievraag te voorzien. Later in dit onderzoek is de impact van deze aanname kwalitatief beschreven.

Case-studie 1: Klein binnenstedelijk project - rioolwerkzaamheden en herbestrating

In Tabel 4 staan de machines, de inzet en de berekende brandstof- energievraag voor een klein binnenstedelijk project; *rioolwerkzaamheden en herbestrating*.

¹⁷ De genoemde energieverliezen dienen enkel als indicatief te worden beschouwd. In de praktijk is het verlies afhankelijk van o.a. het gevraagde vermogen, type werkzaamheden, machine en voertuigconfiguratie, aandeel stationair draaien, etc. Ook is het in sommige gevallen mogelijk om bijvoorbeeld zwenkenergie terug te winnen. Het exacte energiegebruik zal moeten blijken uit praktijkmetingen.

Datum
14 juli 2022

Onze referentie
TNO-2022-NOT-100345396

Blad
25/43

Tabel 4: Typische machine-inzet, berekend brandstofverbruik en geleverde mechanische energie voor rioolwerkzaamheden en herbestrating.

	Aantal machines	Machine inzet [uur/dag]	Diesel [liter/dag]	Mechanische energie [kWh/dag]
Graafmachine (120 kW)	1	8	137	480
Graafmachine (40 kW)	1	8	47	160
Laadschop (100 kW)	1	8	102	320
Triiplaat (7 kW)	1	8	8	22
Lichtmast generator (8 kW)	1	12	8	24
Bemalingspomp (8 kW)	1	24	19	48

In Tabel 5 is de berekende energievraag van dit type project in termen van netcapaciteit en waterstofbehoefte (inclusief 25% marge) weergegeven. Er is onderscheid gemaakt tussen constante stroomvraag voor het benodigde vermogen overdag (vanwege bijvoorbeeld de pomp) en het benodigde vermogen 's nachts voor het bijladen van de accu's. Indien wordt gewerkt met verwisselbare interne accu's of een batterijcontainer, kan het vermogen 's nachts omlaag en het vermogen overdag omhoog. Het hoogste vermogen bepaalt de benodigde aansluiting.

Tabel 5: Berekende energie voor kleine binnenstedelijke bouwplaats bij 100% elektrisch of 100% waterstof.

		Eenheid	Resultaat
Referentie	Diesel	liter/dag	322
Scenario 1	Waterstof	kg/dag	63
	Energievraag waterstof	MWh/dag	2,1
Scenario 2	Energievraag elektriciteit	MWh/dag	1,3
	Gemiddeld vermogen 's nachts	kW	127
	Gemiddeld vermogen stationair	kW	10

Case-studie 2: Binnenstedelijk groot - bouwrijp maken nieuwbouwwijk.

Voor een groot binnenstedelijk project (bouwrijp maken nieuwbouwwijk) dat hieronder beschreven is, is de fasering van de werkzaamheden meegenomen. Dit is relevant omdat niet alle machines gelijktijdig in het project worden ingezet, de fasering is daarom van belang om een overschatting van de energie- en vermogensvraag te voorkomen. Tabel 6 laat het machinepark van dit project zien gedurende verschillende fasen van de bouw.

Tabel 6: Typische machine-inzet voor bouwrijp maken nieuwbouwwijk, inclusief fasering.

	Vermogen (kW)	Aantal machines per fase				
		Grondwerk	Aanleg riool	Fundering	Waterberging	Wegen en constructies
Graafmachine	178	1	1		1	1
Shovel	136	1	1			
Shovel	121	1		1	1	1
Aggregaat	55		1	1	1	
Bronbemaling	15	1	1	1		
Minigraver	37			1		1
Fundering	441			1		
Mobiele kraan	95				1	1
Asfaltspredmachine	145					1
Wals	55					1
Knijperauto	220					1

Datum
14 juli 2022

Onze referentie
TNO-2022-NOT-100345396

Blad
26/43

Voor het machinepark uit Tabel 6 is per fase het gemiddeld dagelijks dieselverbruik en de bijbehorende mechanische energie berekend (Tabel 7).

Tabel 7: Gemiddeld berekende dieselgebruik en mechanische energie per fase van het een groot binnenstedelijk project voorbeeld, wanneer alle voertuigen volledig worden ingezet.

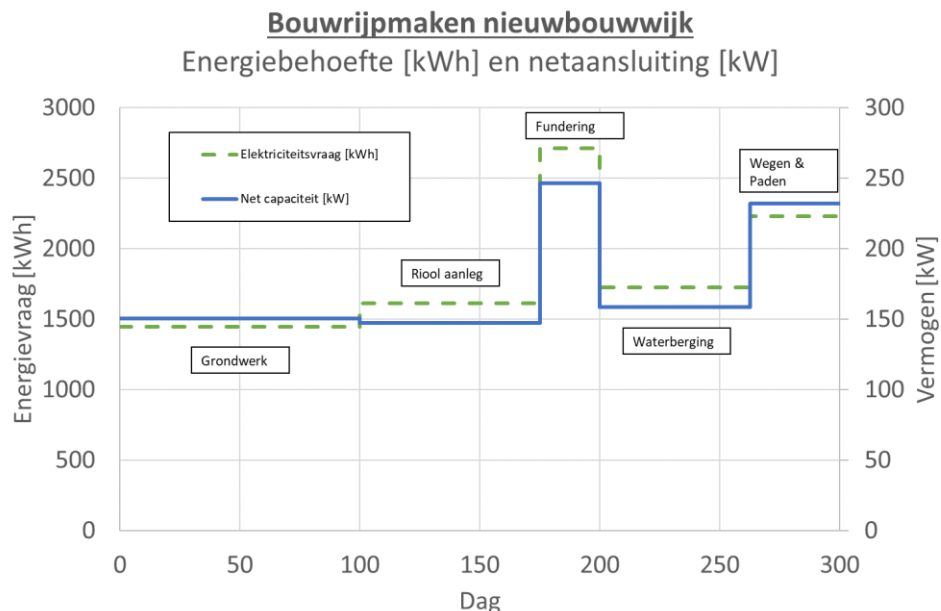
	Diesel [liter/dag]	Mechanische energie [MWh/dag]
Grondwerk ontgraven	359	1,2
Aanleg riool	405	1,3
Fundering	714	2,2
Aanbrengen waterberging	435	1,4
Aanleggen wegen, paden en constructies	563	1,8

Figuur 7 laat voor verschillende fasen in het bouwproject de berekende energievraag per dag zien alsmede het maximaal afgenomen vermogen (inclusief 25% extra flexibiliteitsmarge). Dat laatste bepaalt de zwaarte van de netaansluiting die in verschillende fasen nodig is.

Datum
14 juli 2022

Onze referentie
TNO-2022-NOT-100345396

Blad
27/43



Figuur 7: Energiebehoefte (per dag) en netwerkaansluiting voor groot binnenstedelijk bouwplaats voorbeeld.

Tabel 8 geeft een overzicht van de energievraag van de funderingsfase, de meest energie-intensieve fase van dit project. Het vermogen zoals dat in Tabel 8 voor overdag (stationair) staat genoemd (54 kW), is (bijna) mogelijk met een bestaande zwaardere bouwaansluiting (3x80A). Voor een vermogen van 246 kW voor 's nachts laden zijn meerdere zware aansluitingen nodig of één grootverbruiksaansluiting. Voor een nieuwbouwwijk in de gebruiksfase wordt vaak een aansluiting van 630 tot 1000 kVA georganiseerd. De in de bouwfase benodigde capaciteit valt daarbinnen. Deze aansluiting dient dan bij aanvang van de bouw al beschikbaar te zijn. Indien wordt gewerkt met verwisselbare interne accu's of een batterijcontainer, kan het vermogen 's nachts omlaag en het vermogen overdag omhoog.

Tabel 8: Resultaten funderingsfase bouwrijp maken van een nieuwbouwwijk bij 100% elektrisch of 100% waterstof.

		Eenheid	Resultaat
Referentie	Diesel	liter/dag	714
Scenario 1	Waterstof	kg/dag	131
	Energievraag waterstof	MWh/dag	4,4
Scenario 2	Energievraag elektriciteit	MWh/dag	2,7
	Vermogen 's nachts ¹⁸	kW	246
	Gemiddeld vermogen stationair	kW	54

¹⁸ Het benodigd laadvermogen is lager dan zou worden verwacht wanneer de totale energievraag gedeeld wordt door de laadtijd (12 uur). Dit komt omdat de energievraag van het bekabeld materieel niet 's nachts hoeft worden bijgeladen.

Datum
14 juli 2022

Onze referentie
TNO-2022-NOT-100345396

Blad
28/43

Case-studie 3: Buitenstedelijk groot - snelwegverbreding

Voor een groot landelijk project (snelwegverbreding) dat hieronder beschreven is, is wederom de fasering van de werkzaamheden meegenomen. Tabel 9 laat het machinepark van dit project zien gedurende verschillende fasen van de bouw.

Tabel 9: Machinepark per fase van de bouw voor een groot buitenstedelijk project - snelwegverbreding.

	Vermogen (kW)	Aantal machines per fase				
		Kabels en leidingen	Grond-verzet	Fundering	Bouwfase	Afwerking
Graafmachine	37	2		1		
Rupskraan	162		4			
Laadschop	132		4	1	1	
Tractor + kipkar	37		8			
Grondverdichtingswals	48		3		1	
Funderingsmachine	350			1		
Grondpomp	110			1		
Graafmachine op banden	95				1	
Asfaltspreidmachine	294				2	
Walsen	37				4	
Verreiker	37				3	1
Bakwagen	121					1
Markeringsmachine	48					1

Voor het machinepark uit Tabel 9 is het dagelijks dieselverbruik en de bijbehorende mechanische energie berekend, het totaal per fase is weergegeven in Tabel 10.

Tabel 10: Totaal berekende dieselgebruik en mechanische energie per fase voor een voorbeeld van een groot buitenstedelijk project, wanneer alle voertuigen volledig worden ingezet.

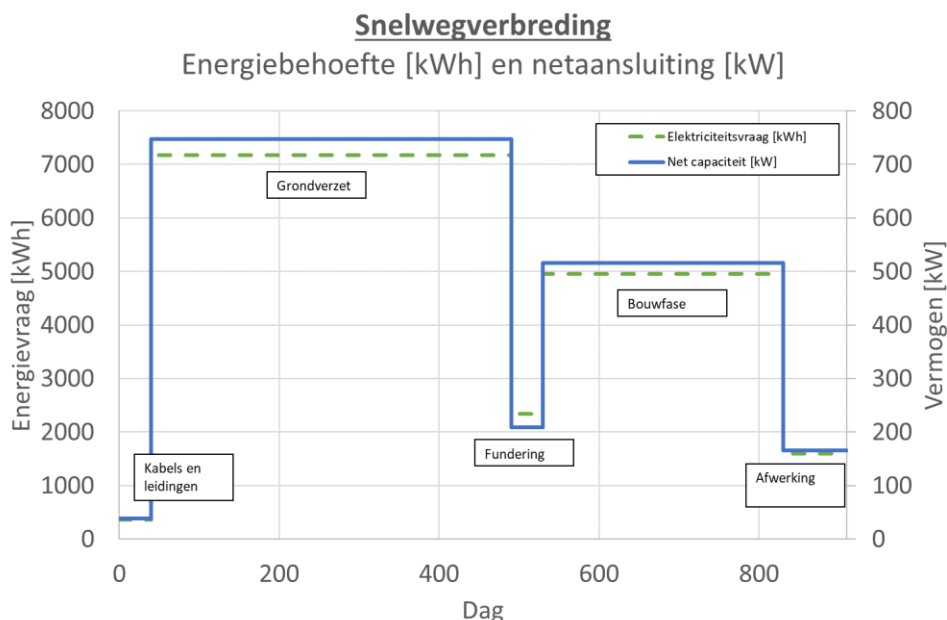
	Diesel [liter/dag]	Mechanische energie [MWh/dag]
Kabels en leidingen	87	0,3
Grondverzet	1.707	5,8
Fundering	543	1,9
Bouwfase	1.257	4,5
Afwerking	360	1,3

In Figuur 8 is gepresenteerd hoeveel laadvermogen (blauwe lijn) er nodig is om 's nachts in 12 uur tijd (inclusief 25% extra flexibiliteitsmarge) de volledige energievraag (groene lijn) bij te laden.

Datum
14 juli 2022

Onze referentie
TNO-2022-NOT-100345396

Blad
29/43



Figuur 8: Benodigde energiebehoefte (per dag) en netwerkaansluiting voor groot buitenstedelijk bouwplaats voorbeeld.

Tabel 11 geeft een overzicht van de energievraag van de grondverzetfase, de meest energie-intensieve fase van dit project. Het benodigde vermogen om de energievraag van het volledige machine park 's nachts te laden is bijna 750 kW. Als een deel van de energie ook overdag wordt geladen is er 's nachts minder vermogen nodig. Om alle werkzaamheden met waterstof uit te voeren is er bijna dagelijks een tube-trailer levering van 400 kg nodig.

Tabel 11: Resultaten voor de grondverzetfase bij een voorbeeld van een groot buitenstedelijk project bij 100% elektrisch of 100% waterstof.

		Eenheid	Resultaat
Referentie	Diesel	liter/dag	1.700
Scenario 1	Waterstof	kg/dag	346
	Energievraag waterstof	MWh/dag	11,6
Scenario 2	Energievraag elektriciteit	MWh/dag	7,2
	Vermogen 's nachts	kW	747

Impact op de infrastructuur

De energiebehoefte van de verschillende casestudies is samengevat in Tabel 12 en Tabel 13. Daarnaast is een indicatie gegeven van de hoeveelheid accucontainers van 1 MWh die per week nodig zijn voor de energiebehoefte. In Tabel 13 is aangegeven hoeveel waterstofleveringen er per week nodig zijn. Deze resultaten kunnen naar rato met de accucapaciteit of inhoud van de waterstoftrailer worden geschaald.

Datum
14 juli 2022

Onze referentie
TNO-2022-NOT-100345396

Blad
30/43

Tabel 12: Samenvattend overzicht van de impact op de infrastructuur, in het geval van volledig (accu)elektrische machines, voor de verschillende case studies. Voor de bouwplaatsen met fasering is de fase met de hoogste vereiste weergegeven.

	Eenheid	Stedelijk Klein	Stedelijk Groot (fundering fase)	Landelijk Groot (grondverzet fase)
Diesel – referentie	liter/week*	1.600	3.600	8.500
Elektriciteitsbehoefte	MWh/week	6,5	13,5	36
Netwerkcapaciteit	kW	127	246	747
Accucontainer leveringen (1MWh)	per week	7	14	36

Tabel 13: Samenvattend overzicht van de impact op de infrastructuur in het geval van waterstofgebruik voor de verschillende case studies. Voor de bouwplaatsen met fasering is de fase met de hoogste vereiste weergegeven.

	Eenheid	Stedelijk Klein	Stedelijk Groot (fundering fase)	Landelijk Groot (grondverzet fase)
Diesel – referentie	liter/week*	1.600	3.600	8.500
Waterstofbehoefte	MWh/week	10,4	21,9	58
	ton/week	0,31	0,65	1,7
Aantal waterstofleveringen per week (400kg tube-trailer)	per week	1	1,5	4,3

* Uitgaande van een werkweek van 5 dagen.

Impact van 'opportunity charging'

Een belangrijke onderliggende aanname bij de berekening van de energievraag in deze casestudies is dat de accu's van de machines voldoende capaciteit hebben om een volledige werkdag te kunnen opereren zonder bij te laden, en dat 's nachts laden voldoende is om de machines de hele dag te kunnen inzetten. In de praktijk kan de accucapaciteit echter wel een belemmering zijn. Wanneer daardoor ook overdag moet worden geladen, treedt er op twee verschillende manieren een effect op ten aanzien van het benodigde vermogen:

- Het beschikbare vermogen overdag moet hoger zijn om het snelladen van één of meerdere werktuigen tegelijk te faciliteren.
- Het vermogen 's nachts kan daardoor lager zijn omdat een deel van de energie overdag al is bijgeladen.

Als de accucapaciteit van een machine wel toereikend is voor een volledige werkdag is er geen hoger vermogen nodig en zorgt toch overdag laden voor een lagere vermogensvraag 's nachts. De laadstrategie heeft daarom ook een belangrijke impact op de benodigde vermogensvraag.

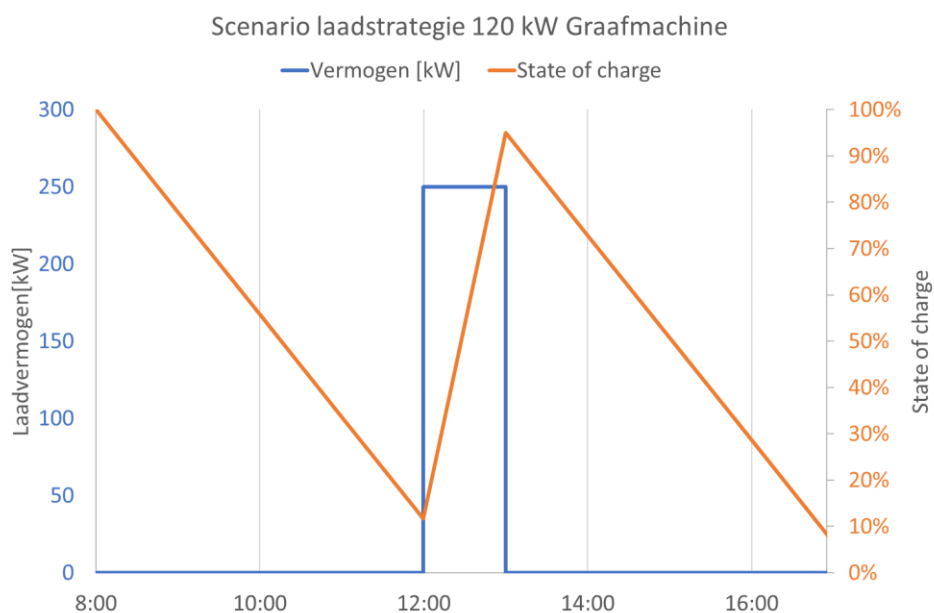
Datum
14 juli 2022

Onze referentie
TNO-2022-NOT-100345396

Blad
31/43

Als voorbeeld wordt gekeken naar de grote graafmachine (120 kW) uit de eerste casestudie. De dieselvariant van deze graafmachine gebruikt volgens de berekening bijna 140 liter diesel per dag. Hierdoor zou de elektrische variant 530 kWh aan accucapaciteit nodig hebben. Rekening houdend met een laadverlies van 10% betekent dat 12 uur lang 's nachts laden met een gemiddeld vermogen van 50 kW.

Een voorbeeld van een 120 kW elektrische graafmachine is de CAT 320 Z-LINE¹⁹, deze graafmachine heeft een accupakket van 300 kWh. Om de benodigde 530 kWh aan energie te leveren gedurende de dag moet er halverwege de dag worden bijgeladen. Hieronder volgt een vereenvoudigd rekenvoorbeeld van een laadstrategie, waarbij gedurende de pauze 1 uur met (hoog vermogen) 250 kW kan worden geladen²⁰.



Figuur 9: Voorbeeld van een laadstrategie van een 120kW graafmachine met een accugrootte van 300 kWh en 1 uur overdag snelladen. De stijgende lijn van de state of charge is hier getoond als een lineaire lijn, maar zal in werkelijkheid een grilliger verloop hebben. Zo neemt de laadsnelheid doorgaans bijvoorbeeld af rond de 80% state of charge.

In dit voorbeeld is het wenselijk om gedurende de dag met een hoogvermogen van 250 kW één machine kort te laden. Als er meerdere machines om 'opportunity charging' vragen is er nog meer vermogen nodig wanneer dit op hetzelfde moment is (zoals tijdens een pauze). Specifiek voor de eerste case-studie was

¹⁹ <https://www.pon-cat.com/nl/producten/graafmachines/middelgrote-graafmachines/cat-320-z-line>

²⁰ Deze specifieke machine kan volgende specificatie met maximaal 150 kW worden geladen.

berekend dat er gemiddeld 130 kW nodig was om 's nachts in 12 uur alle accu's vol te laden. In dit geval is zou één machine 250 kW aan vermogen nodig hebben gedurende de dag, waardoor de stroomvraag overdag leidend is voor de grootte van de netaansluiting. Omdat een deel van de energie overdag wordt geladen is de energievraag gedurende de nacht lager.

Om piekvermogens gedurende de dag op te vangen kan er worden gedacht aan accupakketten die als buffer fungeren. Deze pakketten worden dan opgeladen op het moment dat de stroomvraag laag is (tussen 08:00 en 12:00 bijvoorbeeld) en kunnen worden gebruikt om te voorzien in de (snel)laad behoefte gedurende de dag.

Verwisselbare accupakketten van de machine zelf kunnen ook worden gebruikt als oplossing. In plaats van 1 accu van 300 kWh, zouden bijvoorbeeld 2 pakketten van 150 kWh om-en-om kunnen worden gebruikt. Zodat 1 pakket kan worden opgeladen terwijl de andere wordt gebruikt.

4.2 *Bouwlogistiek*

Bouwlogistiek, en logistiek in het algemeen, kenmerkt zich in de verscheidenheid aan manieren waarop voertuigen worden ingezet. Naast dat er veel verschillende voertuigtypen bestaan, zoals bestelauto's, vrachtauto's, trekker-opleggers en de meer bouwspecifieke voertuigen zoals kippers, asfaltwagens en betonmixers, worden deze ook op verschillende manieren gebruikt.

Het gaat bijvoorbeeld om rechtstreekse ritten tussen een leverancier van prefab-elementen naar de bouwplaats met trekker-opleggers, rondritten met bestelauto's voor het afleveren van afbouwmaterialen of korte ritten naar de bouwplaats vanaf lokale bouwbedrijven. De benodigde laad- en tankinfrastructuur en de energievraag hangen in grote mate samen met deze inzet- en ritprofielen. Daar komt bij dat voertuigen niet noodzakelijkerwijs hoeven te laden op de bouwplaats, maar ook kunnen worden opgeladen bij de bouwhub of private en publieke laad- en tankinfrastructuur. Naast het ritprofiel is dus ook de laadstrategie een belangrijk aspect. Er kan bijvoorbeeld onderweg geladen worden (zoals tijdens het laden/lossen op de thuisbasis of de bestemming of tijdens de pauze van de chauffeur) of op de thuisbasis buiten werktijd. Bij een toenemende actieradius, in combinatie met de mogelijkheid om 's nachts te laden, zal er in afnemende mate behoefte zijn om onderweg op te laden.

Vermogensvraag

Bestelauto's maken vooral gebruik van laadoplossingen tot 100 kW, maar het is mogelijk dat dit in de toekomst toeneemt naar 150 tot 350 kW voor sneller laden [2]. Volgens het Nationaal Kennisplatform Laadinfrastructuur (NKL) zullen middelzware voertuigtypes voornamelijk gebruikmaken van laders met een vermogen tot 150 kW, maar ook oplopend tot 350 kW in het geval van snelladen. Zware vrachtwagens en trekker-opleggers zullen naar verwachting gebruik gaan maken van laadinfrastructuur met vermogens van 50 kW (voor overnight charging) tot 1 MW en hoger voor snelladen. Deze markt is echter nog in ontwikkeling [6].

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

32/43

De enkele voorbeelden van zware volledige elektrische vrachtwagens (zoals in het eerdergenoemde DKTI VERZET-project) maken op dit moment gebruik van laadinfrastructuur met een snellader van een vermogen van 350 kW.

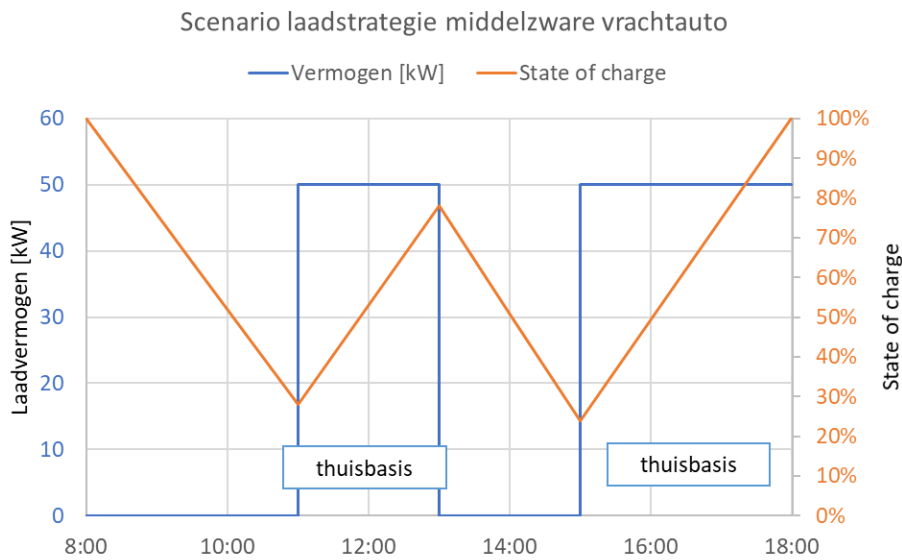
Datum
14 juli 2022

Onze referentie
TNO-2022-NOT-100345396

Blad
33/43

Laadscenario's

Afhankelijk van het ritprofiel en het type voertuig en actieradius zijn er verschillende laadstrategieën denkbaar. In Figuur 10 en Figuur 11 zijn twee mogelijke fictieve scenario's uitgewerkt. Voor het opstellen van deze voorbeelden is gebruik gemaakt van studies van ElaadNL en Topsector Logistiek [7, 6]. Figuur 10 toont een scenario van een middelzware vrachtauto met een accugrootte van 200 kWh en een gemiddeld energiegebruik van 1,2 kWh/km. Het voertuig maakt twee ritten, waarvan de eerste met een afstand van 60 kilometer tussen de leverancier en de bouwplaats. Na het lossen keert het voertuig terug naar de thuisbasis waar wordt geladen met een laadpaal van 50 kW. Nadat het voertuig voldoende is bijgeladen wordt nog een tweede rit gemaakt met een afstand van 45 kilometer enkele rit. Daarna keert het voertuig weer terug naar de thuisbasis. In dit scenario wordt alleen gebruik gemaakt van de laadfaciliteiten op het eigen terrein en er wordt onderweg niet bijgeladen. De energievraag ligt in dit geval op het depot/de locatie van de leverancier en niet op de bouwplaats. Indien een snellader wordt gebruikt, zal de accu sneller voldoende zijn opgeladen om een nieuwe rit te kunnen uitvoeren.



Figuur 10: Voorbeeld van een laadstrategie van een middelzware vrachtauto met een accugrootte van 200 kWh en twee ritten per dag. De stijgende lijn van de state of charge is hier getoond als een lineaire lijn, maar zal in werkelijkheid een grilliger verloop hebben. Zo neemt de laadsnelheid doorgaans bijvoorbeeld af rond de 80%.

Een ander mogelijk scenario is een rit met een trekker-oplegger tussen een leverancier en een bouwplaats waarbij de heen- en terugrit in totaal 350 kilometer is. In Figuur 11 staan twee voorbeelden van een mogelijke laadstrategie, voor trekker-opleggers met een accucapaciteit van 300 kWh resp. 750 kWh. Voor de

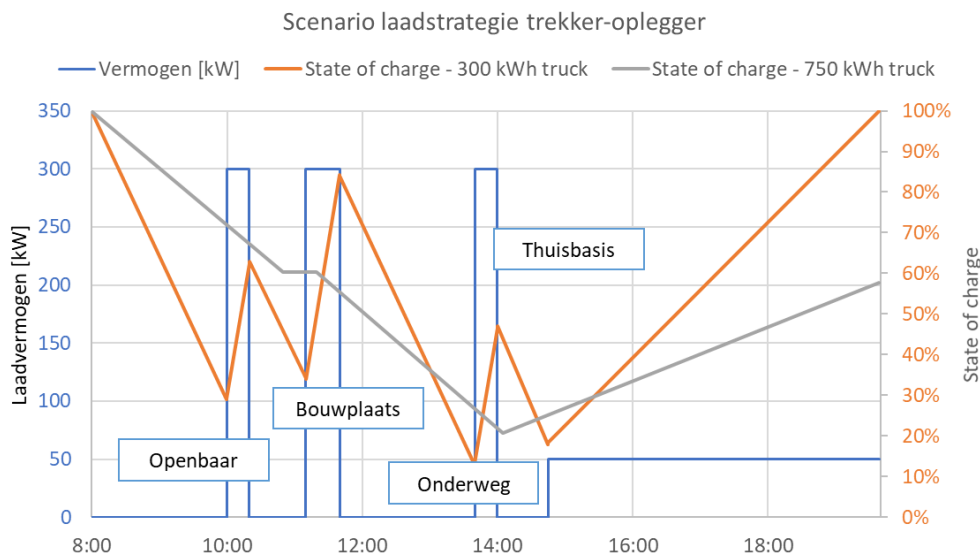
Datum
14 juli 2022

Onze referentie
TNO-2022-NOT-100345396

Blad
34/43

trekker-oplegger in dit voorbeeld is een energiegebruik van 1,7 kWh/km aangenomen. Onderweg en op de bouwplaats zijn laadpalen beschikbaar met een vermogen van 300 kW, daarnaast wordt op het depot bijgeladen met 50 kW in dit voorbeeld. Er is te zien dat het voertuig met een 300 kWh accu een aantal keer moet laden onderweg om de totale rit te voltooien. In dit geval heeft het voertuig op de bouwplaats tijdens het laden en lossen een halfuur geladen en is er zowel op de heen- als terugrit onderweg 20 minuten bijgeladen bij een (semi-)publieke laadpaal. In theorie kan de heenrit worden voltooid zonder onderweg bij te laden. In dat geval wordt wel nagenoeg de hele accucapaciteit gebruikt, en zal op de terugweg langer moeten worden bijgeladen om terug te kunnen rijden naar het depot (doordat er op de bouwplaats niet lang genoeg kan worden geladen voor de terugweg).

Het voertuig met een accucapaciteit van 750 kWh kan de rit uitvoeren zonder tussentijds te laden. De 750 kWh trekker-oplegger arriveert daardoor eerder op bestemming en is ook eerder terug op het depot. Op het depot worden beide voertuigen in dit geval weer volledig bijgeladen. Op het depot is bij hetzelfde vermogen meer tijd nodig voor het volledig bijladen van het 750 kWh accupakket.



Figuur 11: Voorbeeld van een laadstrategie van een trekker-oplegger met een accugrootte van 300 kWh op een rit van 350 kilometer. De stijgende lijn van de state of charge tijdens het opladen is hier getoond als een lineaire lijn, maar zal in werkelijkheid een grilliger verloop hebben.

Figuur 10 en Figuur 11 toonden slechts twee mogelijke scenario's van laadstrategieën. Er zijn echter veel meer scenario's denkbaar. Een bouwhub, waar goederen gelost worden, kan mogelijk ook als laadhub worden toegepast.

Het voorbeeld in Figuur 11 toont een laadstrategie waarbij één van de voertuigen met een inzet in de bouw de accu oplaadt tijdens het laden/lossen op de bouwplaats. Ontwikkelingen op het gebied van accu's voor elektrische

vrachtauto's zorgen voor een toenemende actieradius. Hierdoor worden voertuigen naar de toekomst toe waarschijnlijk minder afhankelijk van tank- en laadinfrastructuur op de bouwplaats of onderweg, als ze de mogelijkheid hebben op 's nachts op het depot te laden. Verschillende truckfabrikanten verwachten in de komende vijf jaar elektrische vrachtauto's met een actieradius van 300 tot 500 kilometer te introduceren. Daarnaast wordt er gewerkt aan waterstof-aangedreven vrachtauto's. Vanuit het perspectief van de bouwplaats verdient het niet direct de voorkeur om op de bouwplaats te laden als dit ook elders kan, tenzij er capaciteit over is op bepaalde delen van de dag.

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

35/43

4.3 Spoorwerktuigen

CE Delft heeft in opdracht van Rijkswaterstaat diverse voorbeeldprojecten in kaart gebracht [8]. Eén van de voorbeeldprojecten was voor ProRail, een voorbeeldproject rondom spoorwerkzaamheden. Dit gaat om een bovenbouwvernieuwing, hierbij wordt het spoor vernieuwd en vinden er werkzaamheden plaats aan het ballastbed en de bovenleiding. Het ingezette materieel zoals beschreven in het voorbeeldproject van CE Delft is weergegeven in de onderstaande tabel 14. De motorvermogens zijn deels overgenomen uit de CE Delft studie, en deels aangepast/toegevoegd op basis van eigen onderzoek.

Om de geleverde (mechanische) energie per dag te berekenen is aangenomen dat het materieel 8 uur per dag wordt ingezet, alleen voor het kleine materieel is 4 uur per dag aangenomen. In de praktijk is het mogelijk dat de inzet per dag niet voor elk materieelstuk 8 uur is, deze informatie is op het moment van schrijven echter niet voorhanden. Naast het aantal uren per dag is een gemiddelde motorbelasting aangenomen per materieelstuk van tussen de 30 en 40%. Praktijkdata ontbreekt om deze motorbelasting goed te kunnen bepalen, hiervoor zijn meer meetgegevens noodzakelijk.

Tabel 14: Materieeloverzicht voor een ProRail bouwplaats ten behoeve van een bovenbouwvernieuwing (bron: CE Delft (waarbij motorvermogen bewerkt is)).

Type	Aantal werktuigen totaal	Motorvermogen [kW]	Mechanische energie [kWh/dag]
Krollen	3	100	960
Shovels	3	120	864
Landbouwtrekkers	3	150	1,440
Lasbussen	4	160	1,792
Wisselstopmachine (met stabilisator)	1	880	2,816
Rail hoogwerkers	2	75	360
Stroomaggregaat	1	20	48
Klein materieel	25	7	210

In Tabel 15 is de berekende energievraag van dit type project in termen van stroomcapaciteit en waterstofbehoefte (inclusief 25% marge) weergegeven. Er is onderscheid gemaakt tussen constante stroomvraag voor het benodigde vermogen overdag (vanwege het stroomaggregaat) en het benodigde vermogen 's nachts voor het bijladen van de accu's (hierbij is ervanuit gegaan dat er 12 uur de tijd is om te laden). Er zijn twee scenario's doorgerekend, een scenario waarbij al het materieel uitstootvrij is, en een tweede scenario waarbij de wisselstopmachine en de 4 lasbussen geen stroom/waterstof op de bouwplaats nodig hebben. De wisselstopmachine is zeer specialistisch, met een lange levensduur en een zeer hoog benodigd vermogen en daarmee energievraag, hierdoor is uitstootvrij op de korte termijn minder realistisch. De lasbussen kunnen ook op de openbare weg rijden, en kunnen daarom makkelijker elders laden.

Het vermogen zoals in Tabel 15 voor overdag (stationair) staat genoemd, is mogelijk met een bestaande standaard bouwaansluiting. De aansluitingen voor 's nachts zijn zwaarder dan nu doorgaans gebruikelijk is. Verder onderzoek is nodig tot in welke mate het ProRail-netwerk dergelijke vermogens kan afgeven ten behoeve van bouwwerkzaamheden. Indien dit materieel uitstootvrij dient te worden, is waarschijnlijk noodzakelijk – gezien de energievraag per dag, en daarmee de benodigde accugrootte - om overdag tussendoor bij te laden, of te werken met verwisselbare interne accu's. Indien wordt gewerkt met verwisselbare interne accu's of een batterijcontainer, kan het vermogen 's nachts omlaag en het vermogen overdag omhoog. Het hoogste vermogen bepaalt de benodigde aansluiting.

Tabel 15: Berekende energie voor een bovenbouwvernieuwing bij een volledig en gedeeltelijke uitstootvrije bouwplaats.

		Eenheid	Resultaat al het materieel	Resultaat excl. lasbussen en wisselstopmachine
Waterstof	Waterstof	kg/dag	505	231
	Energievraag waterstof	MWh/dag	17	7,8
Elektriciteit	Energievraag elektriciteit	MWh/dag	10,5	4,8
	Gemiddeld vermogen 's nachts	kW	1095	502
	Gemiddeld vermogen stationair	kW	9	9

Datum
14 juli 2022

Onze referentie
TNO-2022-NOT-100345396

Blad
36/43

4.4 Waterbouw

Voor de waterbouw is een case doorgerekend voor gebruik van methanol bij twee zoute waterschepen: een kabelschip en een sleepopper (zie onderstaande figuur). Deze case is gebaseerd op informatie uit het project Green Maritime Methanol. Binnen dit traject zijn door verschillende scheepseigenaren ontwerpen gemaakt voor gebruik van methanol als scheepsbrandstof.

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

37/43

 <p>© Van Oord</p>	<table border="0"> <tr><td>Built:</td><td>2014</td></tr> <tr><td>Length over all:</td><td>122.68 m</td></tr> <tr><td>Breadth moulded:</td><td>27.45 m</td></tr> <tr><td>Max. draught dredging:</td><td>5.82 m</td></tr> <tr><td>DWT:</td><td>8,398 tons</td></tr> <tr><td>Cable carousel:</td><td>5,000 tons</td></tr> <tr><td>Total bunker capacity:</td><td>1,678 m³ (incl. service tanks)</td></tr> <tr><td>Main Power:</td><td>10,948 kW (Total Power installed)</td></tr> <tr><td>Speed:</td><td>12.4 knots</td></tr> </table>	Built:	2014	Length over all:	122.68 m	Breadth moulded:	27.45 m	Max. draught dredging:	5.82 m	DWT:	8,398 tons	Cable carousel:	5,000 tons	Total bunker capacity:	1,678 m ³ (incl. service tanks)	Main Power:	10,948 kW (Total Power installed)	Speed:	12.4 knots		
Built:	2014																				
Length over all:	122.68 m																				
Breadth moulded:	27.45 m																				
Max. draught dredging:	5.82 m																				
DWT:	8,398 tons																				
Cable carousel:	5,000 tons																				
Total bunker capacity:	1,678 m ³ (incl. service tanks)																				
Main Power:	10,948 kW (Total Power installed)																				
Speed:	12.4 knots																				
 <p>© Boskalis</p>	<table border="0"> <tr><td>Built:</td><td>2010</td></tr> <tr><td>Buider:</td><td>IHC Dredgers</td></tr> <tr><td>Length over all:</td><td>144 m</td></tr> <tr><td>Breadth moulded:</td><td>28 m</td></tr> <tr><td>Depth to upper deck:</td><td>13.5 m</td></tr> <tr><td>Max. draught dredging:</td><td>10.0 m</td></tr> <tr><td>Displacement:</td><td>34 000 tons (approx.)</td></tr> <tr><td>Hopper capacity:</td><td>12 000 m³</td></tr> <tr><td>Total bunker capacity:</td><td>1,585 ton HFO/MDO (incl. service tanks)</td></tr> <tr><td>Main Power:</td><td>12,000 KW (2x Wärtsilä 12V32)</td></tr> </table>	Built:	2010	Buider:	IHC Dredgers	Length over all:	144 m	Breadth moulded:	28 m	Depth to upper deck:	13.5 m	Max. draught dredging:	10.0 m	Displacement:	34 000 tons (approx.)	Hopper capacity:	12 000 m ³	Total bunker capacity:	1,585 ton HFO/MDO (incl. service tanks)	Main Power:	12,000 KW (2x Wärtsilä 12V32)
Built:	2010																				
Buider:	IHC Dredgers																				
Length over all:	144 m																				
Breadth moulded:	28 m																				
Depth to upper deck:	13.5 m																				
Max. draught dredging:	10.0 m																				
Displacement:	34 000 tons (approx.)																				
Hopper capacity:	12 000 m ³																				
Total bunker capacity:	1,585 ton HFO/MDO (incl. service tanks)																				
Main Power:	12,000 KW (2x Wärtsilä 12V32)																				

Figuur 12: Belangrijkste karakteristieken van de twee scheepstypen (bron: TNO & MKC [9]).

In het ontwerp komen beide partijen uit op een dual-fuel systeem, waarin zowel tanks voor methanol en tanks voor MGO (de referentiebrandstof die nu ook wordt gebruikt) worden toegepast. Redenen hiervoor zijn:

- MGO wordt in een kleine hoeveelheid gebruikt als “pilotbrandstof” in de verbrandingsmotor bij gebruik van methanol
- Door te kiezen voor een dubbel systeem kan ook MGO worden gebunkerd in het geval op een werk- of uitvallocatie geen methanol beschikbaar is.

Datum
14 juli 2022

Onze referentie
TNO-2022-NOT-100345396

Blad
38/43

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de bunkervolumes voor methanol en MGO voor de twee schepen. Voor beide schepen geldt dat door de lagere energiedichtheid van methanol in de nieuwe configuratie de operationele inzet van het schip beïnvloed wordt:

- In het geval van de sleepopper daalt bij het bunkeren van het maximale volume de autonomie van het schip van 33 naar 16 dagen bij gebruik van methanol. Wanneer in het omgebouwde schip alleen MGO wordt gebruikt (maximale capaciteit van 1000 m³), dan neemt de autonomie toe tot 22 dagen.
- De lay-out en volume van de kabellegger zijn gebaseerd op verschillende missieprofielen die zijn doorgerekend. In een relatief kortdurende missie (project op de Noordzee) kan het schip vrijwel volledig varen op methanol. In het geval van een langere missie (een werk op 14 dagen varen afstand) wordt een mix van MGO en methanol gebruikt.

Tabel 16: Bunkervolumes voor de twee use cases.

Scheepstype - Missie	Brandstoftype	Volume [m ³]	
		Referentie	Ombouw
Sleepopper	Methanol		1.337
	MGO	1.585	231
Kabellegger - korte missie	Methanol		517
	MGO	230	10
Kabellegger - lange missie	Methanol		517
	MGO	595	339

Bron: MKC [10]

Voor het bunkeren van deze schepen zijn alleen de shore-to-ship en ship-to-ship methode realistisch.

- Truck-to-ship gaat in zeer beperkte volumes (35 ton of 45 m³). Dit is voldoende voor kleine binnenvaartschepen, maar niet voor de hierboven benoemde volumes.
- Voor bunkeren van methanol vanaf een vaste wallocatie zijn er verschillende opties. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van een bestaande terminallocatie of kan geïnvesteerd worden in een specifieke opslaglocatie. Een investering in een opslagtank van 20,000 m³ wordt geschat op ca. 5 miljoen Euro. Om de schepen ook te voorzien van MGO zou additioneel een bunkerschip naar deze locatie toe moeten komen.
- Ship-to-ship bunkeren kan met een dedicated bunkerschip of inzet van een methanol-binnenvaarttanker.

Voor de korte termijn lijkt bunkeren bij een bestaande importterminal (bijvoorbeeld de VOPAK terminal in Rotterdam) of inzet van een binnenvaarttanker haalbaar. Bij een grotere vraag naar methanol zal in de zeehavens dedicated bunkercapaciteit worden ontwikkeld. Onderstaande tabel geeft een indicatie van de omvang en kosten voor verschillende opties en markten.

Tabel 17: Bunkerkosten voor methanol voor verschillende opties.

Datum
14 juli 2022

Onze referentie
TNO-2022-NOT-100345396

Blad
39/43

Specs	Unit	Binnenvaart ship-to-ship		Binnenvaart truck-to-ship	Shore-to-ship		Maritiem ship-to-ship
Typische bunkerhoeveelheid	ton	100	40	35	100	800	800
	m ³	125	50	45	125	1010	1010
	GJ	1990	796	697	1990	15920	15920
Kosten	€/dag	2200	2200	2300	1050	1050	10000
Aantal bunkeringen	1/dag	4	4	4	6	1	3
Bunkerkosten van de use case	€/GJ	0,28	0,69	0,83	0,08	0,06	0,21

Bron: TNO [11]

5. Conclusies & Aanbevelingen

De realisatie van tank- en laadvoorzieningen is een essentieel onderdeel in de transitie naar de schone en emissieloze bouwplaats en tegelijkertijd is het operationeel een flinke uitdaging. Deze notitie laat zien dat er op dit moment op verschillende manieren invulling kan worden gegeven aan de laad- en tankinfrastructuur voor inzet van elektriciteit respectievelijk waterstof. De markt is echter nog stevig in ontwikkeling, zoals ook blijkt uit de gepresenteerde opties in Hoofdstuk 2, die voornamelijk in pilots en proeftuinen worden toegepast. Het is voor de snelheid van de implementatie en de marktrijpheid van belang dat er op deze manier kennis opgedaan blijft worden. Kennisdeling is belangrijk, zodat opschaling sneller wordt gerealiseerd.

Bijna alle opties voor het laden van uitstootvrij materieel in deze notitie zijn lokaal uitstootvrij. Bij de optie waarin waterstof in een verbrandingsmotor (in een stroomaggregaat) wordt toegepast, komen wel luchtverontreinigende emissies zoals NO_x en fijnstof vrij. Daarnaast zijn voor de waterbouw opties genoemd die niet volledig uitstootvrij zijn.

Een directe netaansluiting is de meest efficiënte oplossing voor de benodigde energiebehoefte (laagste energieverliezen) op de bouwplaats. Over de gehele keten gezien is het totale energierendement van accu/kabel-elektrisch aangedreven werk- en voertuigen hoger dan bij waterstof-aangedreven werktuigen.

Er zijn opties die resulteren in een toename van transportbewegingen. Dit komt door het vervoeren van waterstofcontainers, batterijcontainers en/of verwisselbare accu's. Hierbij zijn de emissies van het transportmiddel ook van belang. In een doorgerekend voorbeeld werd grofweg 5%-10% van de behaalde CO₂-reductie (door toepassing van uitstootvrij materieel op de bouwplaats) teniet gedaan vanwege het transport voor de energievoorziening (wanneer dit met dieselvrachtwagens zou plaatsvinden). In het geval van waterstof zijn er minder transportbewegingen nodig.

Afhankelijk van de emissies die gepaard gaan met de energieopwekking, kunnen er bij uitstootvrije voer-/ werktuigen wel ketenemissies optreden. Om de ketenemissies zoveel mogelijk te reduceren is het daarom ook van belang dat er voldoende duurzame elektriciteit en duurzame waterstof beschikbaar komt. De beschikbaarheid van voldoende groene stroom of groene waterstof is niet vanzelfsprekend en wordt mede bepaald door ander beleid. De vraag naar groene stroom en groene waterstof neemt ook toe in andere sectoren (ook buiten de transportsector). De opties verschillen echter ook qua energie-efficiëntie.

Een ander belangrijk aspect van tank- en laadinfrastructuur zijn de locaties waar de energievraag optreedt. Voor mobiele werktuigen geldt dat de energievraag (vrijwel) volledig op de bouwplaats zal liggen. De energievraag is in sterke mate afhankelijk van de grootte en het type bouwproject. De locatie van de bouwplaats,

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

40/43

bijvoorbeeld in de stad of in de polder, speelt sterk mee in de mate waarin een energievoorziening al beschikbaar of eenvoudig te realiseren is op de bouwplaats. Voor de voertuigen die worden ingezet ten behoeve van bouwlogistiek is de locatie van de energievraag afhankelijk van meerdere factoren, zoals het ritprofiel, de laadstrategie en de accugrootte. Het is belangrijk om ten aanzien van de laadstrategie ook te leren van ervaringen die worden opgedaan in andere logistieke sectoren, zoals de pakketmarkt (bijvoorbeeld DKTI FLEX EV). Indien de accugroottes voldoende toenemen zal de laadbehoefte van voertuigen in mindere mate te komen liggen bij bouwplaatsen en laadpunten onderweg en zal er vaker gebruik worden gemaakt van (semi-)private laadinfrastructuur. Voor spoorwerkzaamheden dient verder onderzocht te worden hoe het meest effectief gebruik gemaakt kan worden van het ProRail-netwerk.

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

41/43

De koppeling met het elektriciteitsnetwerk is een belangrijke factor in het realiseren van tank- en laadvoorzieningen. De toenemende energievraag leidt er toe dat het bestaande elektriciteitsnetwerk steeds meer onder druk komt te staan. Stroomvoorzieningen worden nu bij de netbeheerder aangevraagd nadat het bouwproject is gegund, maar met de toenemende energievraag kan het tijdig realiseren van een netaansluiting op de bouwplaats onder druk komen te staan. Het is van belang om netbeheerders te betrekken, zodat onderzocht kan worden op welke manier zij geholpen kunnen worden om beter in te spelen op de toekomstige energiebehoefte. Kennis blijven opdoen op het gebied van 'smart charging' is bovendien van belang om efficiënt gebruik van het elektriciteitsnet te realiseren.

Uit de verschillende casestudies blijkt dat de energie- en vermogensvraag aanzienlijk verschillend is tussen projecten en ook over de looptijd van projecten. De vermogensvraag varieerde tussen de 120 en 1000 kW in de berekende voorbeelden. De energievraag varieerde tussen de 6,5 en 36 MWh per week. De mogelijke opties voor tank- en laadinfrastructuur kunnen daardoor verschillen per project. Wanneer een aansluiting op het directe stroomnet kan worden gemaakt is dat de meest energie-efficiënte oplossing. Het is echter niet altijd vanzelfsprekend dat een bekabelde stroomvoorziening mogelijk is. Dit komt bijvoorbeeld vanwege de locatie van de bouwplaats of de beschikbare capaciteit op het stroomnet.

Ook zijn de kosten van de verschillende energiedragers een essentieel punt. In het algemeen zijn de elektrische en waterstof-werktuigen momenteel nog 2 tot 3 keer duurder in aanschaf dan vergelijkbare dieselvarianten. Deze hogere investering kan worden gecompenseerd wanneer de waterstof- of elektriciteitsprijs onder een bepaald maximum blijft en er voldoende draaiuren zijn. Wanneer het gebruik van een bepaalde machine hoger is, kan de investering sneller worden terugverdiend. Het is niet vanzelfsprekend dat de prijs van waterstof of elektriciteit lager is dan de additionele investeringskosten.

Aanbevelingen

De belangrijkste aanbevelingen in de realisatie van een toereikende en goede tank- en laadinfrastructuur voor de schone en emissievrije bouwplaats zijn:

- Een toereikende netcapaciteit is essentieel. Gezien de drukte op het elektriciteitsnet is dit niet triviaal. Bovendien moet laden op hoge vermogens mogelijk zijn. Verder onderzoek is nodig om de verwachte totale energievraag vanuit de bouw (bouwplaats en logistiek) in kaart te brengen. Daarbij is het belangrijk om de lokale vermogensbehoefte te beschouwen in relatie tot de lokale/regionale netcapaciteit.
- Stroom op de bouwplaats moet snel en flexibel gerealiseerd kunnen worden (bouwplaatsen zijn immers vaak van korte duur). Dit vraagt om praktische oplossingen. Het liefst via het elektriciteitsnet, en anders via batterijcontainers of verwisselbare interne accu's.
- Het is van belang dat de kosten voor energie laag genoeg blijven, om in ieder geval een deel van de hogere investeringskosten voor schone en emissievrije opties terug te kunnen verdienen.
- Er dient standaardisatie te worden ontwikkeld waarbij laadprotocollen en aansluitingen uniform zijn.
- Meer onderzoek is benodigd op het vlak van veiligheid aangezien hier nog veel onbekend is.
- Verder onderzoek is nodig naar stroomaggregaten op waterstof of andere waterstofdragers (zoals mierenzuur) die een alternatief kunnen zijn voor accucontainers.
- Meer kennis opdoen, onder andere met betrekking tot bovenstaande aspecten, kan worden gedaan via pilots. Enkele opties zijn:
 - o Pilots ten behoeve van de opschaling van grote netaansluitingen en variatie in bouwplaatsen (zowel qua locatie als vermogensvraag).
 - o Pilots met verwisselbare accu's en accucontainers (waarbij ook de milieu-impact van de bijbehorende logistiek wordt meegenomen).
 - o Pilots met H₂-voorziening.

Andere algemeen geldende aspecten die aandacht nodig hebben zijn de beschikbaarheid van groene energie, het balanceren van vraag en aanbod van energie op het net en, daaraan gekoppeld, de inzet van verschillende opslagmogelijkheden van overcapaciteit en de uitrol van laadinfrastructuur in stedelijke gebieden.

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

42/43

Referenties

Datum

14 juli 2022

Onze referentie

TNO-2022-NOT-100345396

Blad

43/43

- [1] Netbeheer Nederland, „Keuzes voor het energienet van de toekomst - tbv formatie,” oktober 2021. [Online]. Available: https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Brief_NBNL_aan_kabinetsformateurs_Koolmees_en_Remkes__01-11-2021_226.pdf.
- [2] Nationaal Kennisplatform Laadinfrastructuur, „Roadmap Logistieke laadinfrastructuur,” 2021.
- [3] M. Hopman, B. Kin, A. Rondaij, H. Quak en T. van Rooijen, „DKTI FLEX EV - Flexibele elektrische pakket- en onderhoudslogistiek regio Rotterdam. TNO 2021 R10630.,” 2021.
- [4] DNV, „RH2INE program: sub-study 1a: Safety framework Conditions. Hydrogen Bunkering Scenarios,” 2021.
- [5] TNO, „Verkenning duurzaamheidsopties zoete waterbouww vloot,” 2022.
- [6] Topsector Logistiek, „Elektrische logistiek: Eisen voor toekomstbestendige laadinfrastructuur. Verkenning.,” 2021.
- [7] P. Broos, R. Noordijk en J. van Rookhuijzen, „Marktverkenning Elektrische trucks Stadslogistiek,” 2019.
- [8] M. Otten, P. v. d. Lande, E. Tol en J. Vendrik, „ZE-bouwplaats - Inrichting ZE-bouwplaats en meerkosten,” CE Delft, Delft, 2022.
- [9] TNO & MKC, „Green Maritime Methanol – Towards a zero emission shipping industry,” 2021.
- [10] MKC, „Green Maritime Methanol: WP 5 - System Design for Short Sea Shipping,” 2020.
- [11] TNO, „Green Maritime Methanol: Operation aspects and the fuel supply chain,” 2020.
- [12] T&E, „How to decarbonise long-haul trucking in Germany. An analysis of available vehicle technologies and their associated costs.,” 2021.
- [13] JRC, „JEC Well-to-Tank report v5,” 2020.
- [14] Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, „Uitstoot vrachtwagens op verschillende energiedragers,” 2020.
- [15] Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, „Uitstoot bestelwagens op verschillende energiedragers,” 2020.