

Gecombineerde deliverables 1.1 en 1.2

TRANSENERGY - Conceptueel model en case study ontwerp

TNO 2024 P11731 – 17 september 2024

TRANSENERGY - Conceptueel model en case study ontwerp

Gecombineerde deliverables 1.1 en 1.2

Auteurs	Hans Quak, Annette Rondaij
Exemplaar nummer	2024-STL-DLV-100354732
Aantal pagina's	52 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	TKI Dinalog
Programmanaam	Schoon en Emissieloos Bouwen (SEB) als bedoeld in artikel 2 onder a van de Tijdelijke subsidieregeling onderzoek Topsector Logistiek 2022-2026
Projectnaam	TRANSENERGY
Projectnummer	060.56353

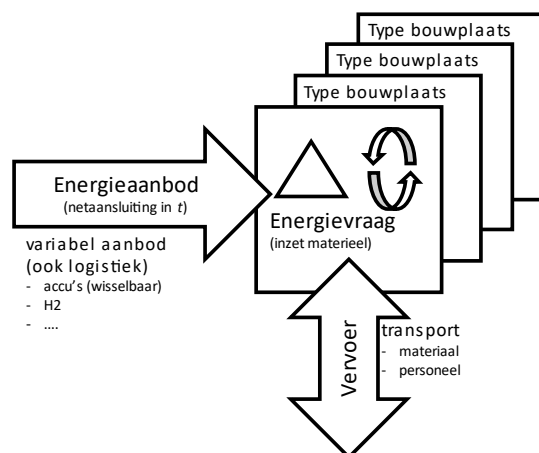
Alle rechten voorbehouden

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

© 2024 TNO

Samenvatting

TRANSENERGY is een project dat kennis ontwikkelt voor de realisatie van ZE bouwplaatsen met als doel inzicht te geven in de mogelijkheden en effecten van verschillende manieren van energievoorziening voor verschillende bouwplaatsen. In hoeverre een zero-emissie bouwplaats (ZEB) (deels) gerealiseerd kan worden is onder meer afhankelijk van de energievoorziening op de bouwplaats. Om te komen tot een effectieve aanpak voor de realisatie van een (gedeeltelijke) ZE bouwplaats, en daarmee tot vermindering van CO₂-emissies en NO_x-uitstoot in de bouwactiviteiten en bouwlogistiek, zijn er verschillende factoren die elkaar beïnvloeden en als zodanig niet los van elkaar kunnen worden beschouwd. Gezamenlijk dragen deze factoren bij aan de energiebehoefte (en de mogelijkheden voor een ZE bouwplaats). Deze factoren kunnen we op hoofdlijnen als volgt classificeren (zie ook Figuur S.1): type bouwplaats, energievoorziening en mogelijkheden (het energieaanbod), materieel op de bouwplaats (de energievraag), het vervoer van en naar de bouwplaats (van zowel materiaal, materieel en personeel) en de logistiek van energiedragers op en rond de bouwplaats.



Figuur S.1: Schets relaties factoren type bouwplaats, energieaanbod, energievraag en vervoer (voorstel)

TRANSENERGY volgt een case study aanpak. Er zijn twee typen cases die we onderscheiden:

- **TRANSENERGY cases.** Reeds geselecteerde cases, waarbij het gaat om een samenwerking met partners in TRANSENERGY om data te verzamelen gedurende een langere looptijd, het gaat hier om in-depth cases. Hierin verzamelen we binnen het project primary data door monitoring op de bouwplaatsen.
- **Externe cases.** Voor de externe cases maken we gebruik van reeds verzamelde data en/of een beperkt aantal interviews per case om zo voor elke case inzicht te krijgen in de kenmerken, het ontwerp en de uitkomsten. Er wordt geen nieuwe data verzameld op bouwplaatsen. De selectie van de externe cases moet nog plaatsvinden in deze fase van het project. De selectiecriteria op basis waarvan de externe cases worden geselecteerd, worden in het case study protocol beschreven.

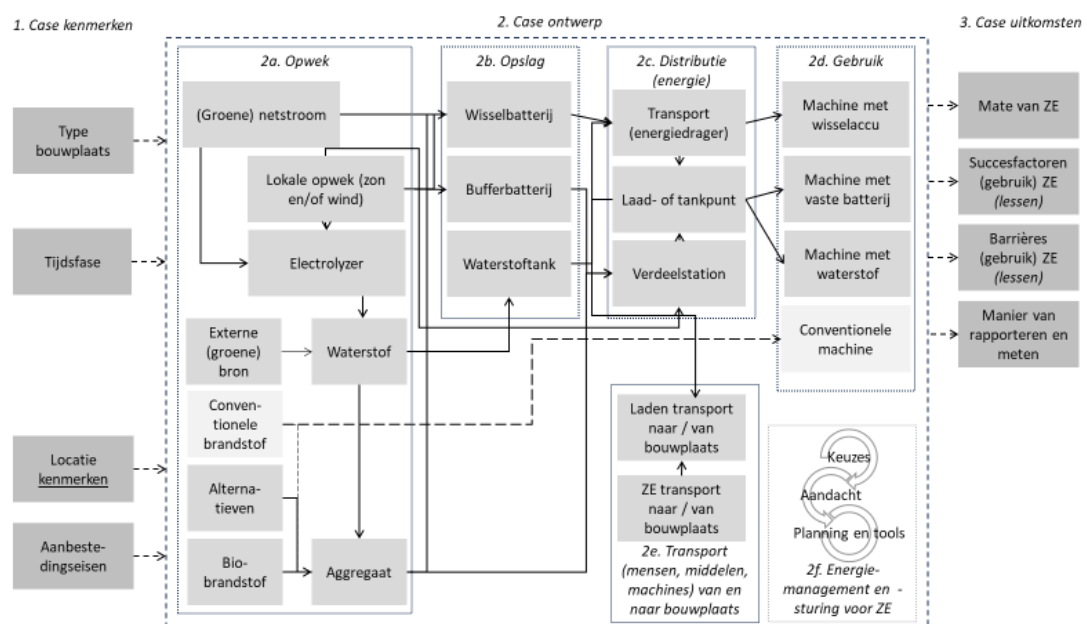
TRANSENERGY is dus geen project waarin op grote schaal materieel en inzet gemonitord worden, maar een project waarin juist op basis de verschillende trajecten waar dit wel gedaan is naar algemenere bevindingen – dus wat we kunnen leren van de verschillende bouwprojecten. Voor de vier specifieke TRANSENERGY cases wordt hiernaast wel primaire data verzameld.

Deze deliverable rapporteert de activiteiten van WP1 uit het project TRANSENERGY, namelijk:

- Activiteit 1.1: theorie-ontwikkeling door verdere uitwerking van de vier factoren (Figuur s.1) en de onderlinge relaties op basis van literatuur en verslagen van praktijkprojecten (bureau-onderzoek). In de eerste activiteiten brengen we de bestaande kennis in kaart als start van TRANSENERGY. Uiteindelijk ontwerpen we op basis hiervan een **conceptueel model** dat we in het vervolg van het traject gebruiken, toetsen en doorontwikkelen.
- Activiteit 1.2: **case study protocol**. In WP1 bepalen we met de partners in de TRANSENERGY-cases wat we samen kunnen monitoren in welke periode. Voor de gehele case study maken we het case study protocol op basis van de stappen in Rashid et al., 2019 en Voss et al (2002; 2015) en we bepalen case-selectiecriteria voor de externe cases.

Conceptueel model

Figuur s.2 laat het conceptueel model zien dat is opgesteld op basis van de uitkomsten van het bureauonderzoek naar eerdere studies en dat gebruikt gaat worden om de verschillende cases in TRANSENERGY te beschrijven, classificeren en uiteindelijk ook om de cross-case analyse mee uit te voeren.



Figuur S.2: Conceptueel model

Het conceptueel model bestaat uit drie verschillende delen (van links naar rechts):

1. Case kenmerken (1);
2. Case ontwerp (2, met onderdelen *a.* opwek, *b.* opslag, *c.* distributie (energie), *d.* gebruik, *e.* transport (mensen, middelen, machines) van en naar de bouwplaats en *f.* energiemanagement en -sturing voor ZE;
3. Case uitkomsten (3).

Het case ontwerp, dat is de manier waarop het energieaanbod – op basis van de verwachte of gerealiseerde energievraag – op de (zero emissie) bouwplaats wordt voorzien, is het grootste deel van het conceptueel model. De andere delen gaan vooral over de context (de case kenmerken) waarbinnen het bouwproject plaatsvindt en de resultaten, specifiek op het gebied van ZE bouw, die volgen uit de case.

Case study protocol

Het case study protocol geeft volgens Rashid et al. (2019) de onderzoekers richtlijnen voor het verzamelen van data en de analyse van de cases. Hieronder zijn een aantal zaken, zoals de onderzoeksvraag, de definitie van bestudeerde verschijnselen en de caseselectie, kort uitgewerkt.

Onderzoeksvraag

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

Deze hoofdvraag valt uiteen in verschillende deelvragen, op basis van het conceptueel model. Om de onderzoeksvragen te beantwoorden maken we in TRANSENERGY gebruik van een (meervoudige) case study onderzoeksstrategie.

Definitie van bestudeerde verschijnselen en eenheid van analyse

De bestudeerde verschijnselen worden gedefinieerd vanuit het conceptueel model; de (zero-emissie) bouwplaats is de eenheid van analyse, dus de case.

Dit betekent dat de volgende zaken worden bestudeerd:

- de kenmerken van de bouwplaats (zie 1. Case kenmerken in Figuur 4.1);
- het ontwerp van de energievoorziening op de bouwplaats en de verbruik van energie / inzet van machines op (en van en naar) de bouwplaats (zie 2. Case ontwerp in Figuur 4.1);
- de lessen en ervaringen met de inzet van ZE materieel en middelen (zie 3. Case uitkomsten in Figuur 4.1).

Onderwerpen voor interviews en databehoefte

De cases – en dan gaat het vooral om de externe cases – worden geanalyseerd op basis van bestaande case-documentatie – hierbij zijn we dus afhankelijk van wat er aan beschrijvingen en / of monitoringsinformatie beschikbaar is – en interviews. De documentatie zou moeten gaan over minimaal één van de drie blokken uit het conceptueel model: kenmerken, ontwerp en uitkomsten. Als dit vanuit de documentatie niet beschikbaar is, is aanvullende informatie vanuit een interview (of meerdere interviews) noodzakelijk.

Caseselectie

De selectie van cases – dit geldt voor de externe cases, aangezien de TRANSENERGY cases in samenwerking met de projectpartners verder worden vormgegeven – is relatief eenvoudig.

De case moet aan de volgende eisen voldoen:

- Er moet sprake zijn van een (gedeeltelijke) ZE bouwplaats – dat betekent dat er ZE materieel wordt ingezet op de bouwplaats en dat opgeladen moet worden / van energie

moet worden voorzien of dat er ZE voertuigen (bij)geladen worden op de bouwplaats vanuit hiervoor beschikbaar gemaakte laadcapaciteit of dat er moet sprake zijn van (mislukte) plannen om ZE materieel in te zetten en / of ZE voertuigen op te laden op de bouwplaats.

Inhoudsopgave

Bijlage

Bijlage A: Monitoringsplan vanuit DKTl project Funda(ce)ment	47
--	----

Samenvatting	3
--------------	---

Inhoudsopgave	7
---------------	---

1 Inleiding: richting een zero-emissie bouwplaats	8
---	---

1.1 Energietransitie op de bouwplaats – de route naar een zero-emissie bouwplaats	8
---	---

1.2 TRANSENERGY onderzoek naar wat er mogelijk is rond een zero emissie bouwplaats	10
--	----

1.3 Leeswijzer ‘Gecombineerde deliverables 1.1 en 1.2 TRANSENERGY - Conceptueel model en case study ontwerp’	14
--	----

2 TRANSENERGY	15
---------------	----

2.1 TRANSENERGY projectopzet	15
------------------------------	----

2.2 TRANSENERGY werkpakket 1: case study define & design	16
--	----

3 Definieren en ontwerpen: belangrijke factoren	18
---	----

3.1 Inleiding en verantwoording	18
---------------------------------	----

3.2 Van factoren naar conceptueel model	18
---	----

3.2.1 Energieaanbod	18
---------------------	----

3.2.2 Energiebehoefte	22
-----------------------	----

3.2.3 Type bouwplaats	22
-----------------------	----

3.2.4 Vervoer van en naar de bouwplaats (van zowel materiaal, materieel en personeel)	24
---	----

4 Conceptueel model	26
---------------------	----

4.1 TRANSENERGY conceptueel model	26
-----------------------------------	----

4.2 Case kenmerken	27
--------------------	----

4.3 Case ontwerp	28
------------------	----

4.3.1 Opwekking	28
-----------------	----

4.3.2 Opslag	29
--------------	----

4.3.3 Distributie (energie)	29
-----------------------------	----

4.3.4 Gebruik	30
---------------	----

4.3.5 Transport (mensen, middelen, machines en energiedragers) van en naar bouwplaats	31
---	----

4.3.6 Energiemanagement en -sturing voor ZE bouw	31
--	----

4.4 Case uitkomsten	31
---------------------	----

5 Case study ontwerp	33
----------------------	----

5.1 Onderscheid TRANSENERGY cases (WP2) en externe cases (WP3)	33
--	----

5.2 Case study protocol	33
-------------------------	----

5.2.1 Onderzoeksvraag	34
-----------------------	----

5.2.2 Eenheid van analyse	35
---------------------------	----

5.2.3 Definitie van bestudeerde verschijnselen	35
--	----

5.2.4 Onderwerpen voor interviews en databehoeft	36
--	----

5.2.5 Case selectie (externe cases, WP3)	37
--	----

5.3 Monitoring van data in TRANSENERGY cases (WP2)	37
--	----

5.3.1 Case: Harderwijk - Emissieloze bouwplaats “Waterfront Fase 3”	38
---	----

5.3.2 Case: SOK verhardingen Amsterdam	38
--	----

5.3.3 Case: ProRail	38
---------------------	----

5.3.4	Case: Dijkversterking Tiel-Waardenburg.....	39
6	Vervolg TRANSENERGY.....	41
	Referenties	42
	Ondertekening.....	45
Bijlage		
Bijlage A:	Monitoringsplan vanuit DKTl project Funda(ce)ment	46

1 Inleiding: richting een zero-emissie bouwplaats

1.1 Energietransitie op de bouwplaats – de route naar een zero-emissie bouwplaats

De motivatie voor het TRANSENERGY onderzoek komt voort uit de ambitie van de Rijksoverheid en Topsector Logistiek om te komen tot zero-emissie (ZE) bouwplaatsen en de concrete en actuele behoefte naar een realistisch en haalbaar pad om schoon en emissieloos bouwen ook daadwerkelijk in de praktijk te brengen. Het doel hiervan is om ervoor te zorgen dat bouwprojecten leiden tot minder stikstofuitstoot (NO_x) en de uitstoot van andere schadelijke stoffen (CO_2 en fijnstof) (Dinalog, 2022). Deze urgente behoefte komt voort uit de algemene noodzaak om vanuit alle sectoren (waaronder de bouw) bij te dragen aan de reductie van stikstofemissies om de Nederlandse natuur de kans te geven te herstellen. Voor Natura 2000-gebieden specifiek volgt dit bovendien uit de wettelijke verplichtingen vanuit de Habitatrichtlijn¹ (die Europese lidstaten verplicht om maatregelen te treffen om verdere verslechtering van de staat van de natuur in Natura 2000-gebieden te voorkomen).

Dit levert voor de bouwsector problemen op: voor de bouwsector geldt dat veel bouwprojecten geen vergunning zouden kunnen krijgen bij uitvoering met de gangbare inzet van mobiele werktuigen en bouwvoertuigen leidt dit voor veel bouwprojecten in de buurt van Natura 2000-gebieden tot overschrijding van de (stikstof)norm en derhalve tot intrekking van de bouwvergunning.² Om een voorbeeld te noemen, in de provincie Noord-Brabant is zelfs al aangekondigd dat de vergunningverlening voor aanvragen die tot extra stikstofdepositie op Natura 2000-gebieden leiden (voorlopig) stilligt naar aanleiding van analyses die een verslechterd beeld van de natuur laten zien³.

De impact van bouw(logistiek) moet dus aanzienlijk worden verminderd. En dat terwijl de bouwopgave de komende jaren juist enorm is: zowel qua nieuwbouw (denk aan woningen om de bestaande wooncrisis te verlichten) als qua renovatie (met betrekking tot verduurzaming bestaande gebouwen en vervanging van infrastructuur) en de bouwactiviteiten die er nog bijkomen met betrekking tot de energietransitie.

Kortom, het is noodzakelijk dat bouwactiviteiten kunnen blijven doorgaan om:

- de wooncrisis aan te pakken;
- te voorkomen dat verslechtering van de huidige staat van wegen, tunnels, bruggen, etc. leidt tot het afsluiten van cruciale infrastructuur;

¹ De Habitatrichtlijn (92/43/EEG – 1992):

<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31992L0043:NL:HTML>

² Voor activiteiten die leiden tot stikstofdepositie in een Europees beschermd natuurgebied Natura 2000-gebied volgens de Wet natuurbescherming (artikel 2.7) een vergunning nodig.

³ <https://www.brabant.nl/actueel/nieuws/natuur-en-landschap/2023/analyses-bevestigen-slechte-staat-natuur-brabant> (laatst bezocht: 5-4-2023)

- de energietransitie niet te vertragen, bijvoorbeeld doordat de aanleg van zonne- en windenergieparken stil zou komen te liggen.

Het gaat in de bouwopgave dus niet alleen om activiteiten in de Woning- en Utiliteitsbouw, maar ook om bouwtrajecten met betrekking tot Weg, Dijk en Spoor, Kustlijn zorg en Vaargeulonderhoud en Energie (zie SEB, 2023).

De behoefte naar een snelle transitie richting schoon en emissieloos bouwen is groot bij de Rijksoverheid, decentrale overheden, de bouwsector en Topsector Logistiek en staat prominent op de roadmap van TNO Unit MBE (Mobility & Built Environment). Ook bij de TRANSENERGY-consortiumleden, alsmede de partijen die in de praktijk werken met de (praktische) uitdagingen die zero-emissie bouwplaatsen met zich meebrengen, leeft dit sterk: zij hebben veel vragen over hoe aan verschillende randvoorwaarden kan worden voldaan om de inzet van ZE materieel in de praktijk te realiseren.

In hoeverre een zero-emissie bouwplaats (ZEB) (deels) gerealiseerd kan worden is afhankelijk van verschillende factoren. Via verschillende onderzoeken wordt er gewerkt aan het inzichtelijk en overbrugbaar maken van deze factoren. Er worden bijvoorbeeld veel demonstratieprojecten uitgevoerd waarin met verschillende oplossingsrichtingen wordt gewerkt vanuit verschillende programma's zoals het kennis- en innovatieprogramma Schoon en Emissieloos Bouwen (en de Subsidieregeling Schoon en Emissieloos Bouwmaterieel, SSEB), Topsector Logistiek (toepassingsgebied mobiele werktuigen en bouwlogistiek) en verschillende DKTI-projecten (zie bijvoorbeeld DKTI VERZET, DKTI Bouwplaats van Morgen, DKTI Funda(ce)ment). Ook wordt er onderzoek gedaan naar verschillende factoren die de inzet van ZE (zero-emissie) oplossingen belemmeren of kunnen faciliteren, maar er is nog geen algemeen beeld van hoe een ZE bouwplaats te realiseren is en wie daarvoor op welk moment welke mogelijkheden heeft / keuzen kan maken.

Naast de beschikbaarheid van ZE machines en ZE voertuigen, slimme bouwlogistieke concepten en emissiearme bouwmethoden is de energievoorziening op de bouwplaats een belangrijke factor. Over specifiek deze factor wil TRANSENERGY ervaring opdoen met verschillende oplossingsrichtingen. Uit verschillende onderzoeken, zoals van TNO (2020) en Natuur & Milieu (2019), blijkt dat de grootste uitdaging in de elektrificatie van bouw materiaal en bouwtransport ligt in de beschikbaarheid van voldoende laadinfrastructuur op de juiste tijd en plaats. De verduurzaming van de bouwplaats vraagt om afstemming van energielevering en energievraag. De energielevering (oftewel de vermogensvraag) is variabel in tijd gedurende het bouwtraject en er kunnen zich hoge pieken voordoen. Het energielevering is bovendien ook niet altijd constant (dit treedt bijvoorbeeld op als er geen netaansluiting kan worden gerealiseerd). Afstemming tussen energielevering en energievraag is dus maatwerk en belangrijk om te voorkomen dat het bouwproject vertraging oploopt vanwege een hogere energievraag dan -aanbod.

1.2 TRANSENERGY onderzoek naar wat er mogelijk is rond een zero emissie bouwplaats

TRANSENERGY gaat specifiek in op (een deel van) de uitvraag die Dinalog (2022) deed, namelijk: ‘onderzoek naar de energietransitie logistiek op de bouwplaats’⁴. Een deel van de schadelijke emissies van stikstof (NO_x) en andere stoffen (CO₂, fijnstof) vindt plaats op bouwplaatsen, bijvoorbeeld door de inzet van materieel op de bouwlocaties, maar ook door logistieke activiteiten gerelateerd aan het last-mile vervoer van materialen en bouwpersoneel naar deze locaties. De inzet van emissiearme en emissieloze werktuigen, voertuigen en vaartuigen gaat de komende jaren verder toenemen, mede mogelijk gemaakt vanuit programma’s zoals SSEB (Subsidieregeling Schoon en Emissieloos Bouwmaterieel), maar ook SEBA (Subsidieregeling Emissieloze Bedrijfsauto’s) en AanZET (Aanschafsubsidie Zero-Emissie Trucks april 2023, binnen 9 uur twee keer overtekend⁵) (zie RVO, 2023abc), maar deels ook vanuit eisen door de opdrachtgever (zie bijvoorbeeld RWS, 2021; Prorail, 2022). TRANSENERGY richt zich op de steeds urgenter wordende uitdagingen met betrekking tot de energie-infrastructuur die voortkomen uit het feit dat er meer ZE materieel en voertuigen beschikbaar gaan komen en ingezet gaan worden in de praktijk en de daaraan gekoppelde energiebehoefte. Om tot een ZE bouwplaats te kunnen komen is een andere energievoorziening op de bouwplaats noodzakelijk. De mogelijkheden en specifieke behoefte hiervoor verschillen per type bouwplaats. Een binnenstedelijke nieuwbouwlocatie voor woning- of utiliteitsbouw kent daarin andere mogelijkheden en beperkingen dan bijvoorbeeld een onderhoudsproject in de GWW-sector (Grond-, Weg- en Waterbouw) in het buitengebied.

Er zijn verschillende concrete problemen waarvoor oplossingen gevonden moeten worden om uiteindelijk tot zero-emissiebouwplaatsen in de praktijk te kunnen komen, hierbij gaat het om:

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

TRANSENERGY gaat in op de relatie tussen het energieaanbod en de energievraag op verschillende typen bouwplaatsen (zie Figuur 1.1). Ook al gebeurt er (op lokale schaal) al van alles in de praktijk, een goed beeld van de relatie tussen de energiebehoefte en de logistiek op verschillende typen bouwplaatsen op de langere termijn is er niet. Het is van belang dat dit beeld er wel komt om opschaalbare concepten te realiseren die bijdragen aan (deels) uitstootvrije bouwplaatsen.

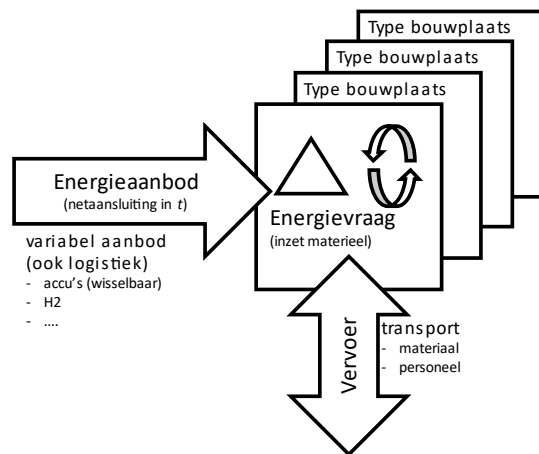
De opschaalbaarheid wordt aanzienlijk vergroot als bekend is wat de belangrijkste overeenkomsten zijn bij verschillende typen bouwprojecten die efficiënte organisatie en

⁴ Logistiek op de bouwplaats is meer dan alleen het transport van materiaal (en grond), materieel, mensen en energiedragers van en naar de bouwplaats; het gaat ook over de inzet (planning, besturing en organisatie) van materieel en mensen en daarmee ook over de planning van de energiebehoefte in tijd

⁵ <https://www.transport-online.nl/site/152820/subsidie-aanzet-binnen-een-dag-twee-keer-overtekend/>

inzet van energievoorzieningen bepalen. Binnen TRANSENERGY willen we daarom werken aan het verkrijgen van inzichten uit de praktijk door (op bepaalde locaties in bepaalde processen) te experimenteren met de inzet van ZE materieel en / of alternatieve laadmogelijkheden om in de (toekomstige) energiebehoefte op de bouwplaats te kunnen voorzien. Naast deze case studies, halen we binnen TRANSENERGY ook informatie en ervaringen op bij externe cases via interviews en desk research om een overkoepelende analyse te doen van wat wel en niet werkt rondom energievoorzieningen voor (deels) emissieloze bouwplaatsen en hoe dit verschilt voor verschillende typen bouwplaatsen. Dit moet leiden tot meer gegeneraliseerde kennis, terwijl nog steeds rekening wordt gehouden met de diversiteit aan type bouwplaatsen. Dit is ook nuttig in relatie tot de uitwerking van de transitiepaden binnen SEB die partijen in de bouwsector helpen om de transitie te gaan maken. Met deze activiteiten wil TRANSENERGY bijdragen aan snellere opschaling van de inzet van emissieloze mobiele werktuigen en bouwvoertuigen.

Om te komen tot een effectieve aanpak voor de realisatie van een (gedeeltelijke) ZE bouwplaats, en daarmee tot vermindering van CO₂-emissies en NO_x-uitstoot in de bouwactiviteiten en bouwlogistiek, zijn er verschillende factoren die elkaar beïnvloeden en als zodanig niet los van elkaar kunnen worden beschouwd. Gezamenlijk dragen deze factoren bij aan de energiebehoefte (en de mogelijkheden voor een ZE bouwplaats). Deze factoren kunnen we op hoofdlijnen als volgt classificeren (zie ook Figuur 1.1): type bouwplaats, energievoorziening en mogelijkheden (het energieaanbod), materieel op de bouwplaats (de energievraag), het vervoer van en naar de bouwplaats (van zowel materiaal, materieel en personeel), en ook de logistiek van energiedragers op en rond de bouwplaats . Wat bedoeld wordt met deze factoren bespreken we hieronder kort.



Figuur 1.1: Schets relaties factoren type bouwplaats, energieaanbod, energievraag en vervoer (voorstel)

1. Type bouwplaats – het type bouwplaats bepaalt deels de mogelijke energievoorzieningen (is er een mogelijke netaansluiting en met welk vermogen), maar ook welke activiteiten en materieel er aanwezig zullen zijn en dus welke energievraag er is. Binnen SEB (2023) wordt in de transitiepaden onderscheid gemaakt tussen bouwplaatsen met betrekking tot (1) weg, dijk en spoor, (2) kustlijnverzorging en vaargeulonderhoud, (3) woning- en utiliteitsbouw, en (4) energie. NAL (2023ab) onderscheidt de volgende type werkzaamheden: rioolrenovatie, herinrichting woonstraat, asfaltering bestaande weg, bouwrijp maken terrein voor 20 woningen, sloopwerk bestaand gebouw en funderingswerken hoogbouw in de (in hun opdracht ontwikkelde) tool ‘vermogensvraag

bouwproject'. In de Emissieregistratie (nationale rapportages emissietotalen) wordt weer net een iets ander onderscheid gemaakt op basis van activiteiten voor mobiele werktuigen in de bouwsector: nieuwbouw woningen en gebouwen, onderhoud van woningen en gebouwen, nieuwbouw van wegen, onderhoud van wegen, kabel- en pijpleidingen, civiele kunstwerken, kust en oever en baggerwerk (Emissieregistratie, 2023).

2. Energievoorziening en mogelijkheden – de aanwezige en mogelijke netaansluiting wisselt per bouwplaats, dat geldt ook voor de flexibele mogelijkheden, zoals batterijcontainers of andere flexibele energievoorzieningen. Niet alleen kan de mogelijke bestaande netaansluiting verschillen, ook de -binnen de termijn van het bouwtraject te realiseren- maximale netaansluiting zal per bouwplaats verschillen. De mogelijkheden om aan te sluiten op het net zijn ook afhankelijk van de locatie, bijvoorbeeld in de bebouwde omgeving of (ver) daarbuiten. Ook kan er in een bepaald gebied een tekort aan netcapaciteit zijn. De vraag is verder of er een maximale netaansluiting noodzakelijk is, of dat bij een bepaalde (tijdelijke) piekvraag flexibele voorzieningen kunnen bijdragen aan voldoende energievoorziening, ook mogelijkheden voor het lokaal opwekken van energie zijn hier van belang. TNO (2022) maakt (in een opdracht voor projectteam SEB) bijvoorbeeld onderscheid in: directe netaansluiting, mobiele batterijcontainer, verwisselbare interne accu (en het eventueel laden op alternatieve locatie), waterstofcontainer (al dan niet met een waterstofstroomaggregaat) en alternatieve brandstoffen voor vaartuigen in de waterbouw. Dergelijke oplossingen kunnen op verschillende manieren worden ingezet, zo kan bijvoorbeeld alleen buiten werktijden bijgeladen worden, of kan tussendoor bijgeladen worden. De gekozen laadstrategie heeft invloed op de benodigde capaciteit van de laadvoorziening. Naast dit soort fysieke oplossingen, kunnen alternatieve contractvormen ook een oplossing bieden; bijvoorbeeld een ongegarandeerde aansluiting (CE Delft, 2022b), waarmee er minder zekerheid over het beschikbare vermogen is, maar die wel kan zorgen voor een snellere aansluiting tegen lagere kosten.
3. Materieel op de bouwplaats – het materieel dat gebruikt wordt op de bouwplaats bepaalt voor een groot deel de emissies op en rond de bouwplaats (het andere deel wordt bepaald door de factor: nummer 4 voor emissies van vervoer van en naar de bouwplaats). Naast het type materieel is ook de inzet bepalend voor de emissies (of voor de ZE mogelijkheden van materieel). Allereerst is er op de verschillende type bouwplaatsen een grote variëteit aan materieel aanwezig. CE (2022a) onderscheidt materieel per functie (denk aan onder andere: transporteren, frezen, hijen, graven, schaven, damwanden slaan, hijsen, pompen, boren, asfalt spreiden, zagen, lucht comprimeren, walsen, trillen, zuigen, hoog-/laagwerken, aanstampen, vegen, lassen, etc. En binnen deze functies onderscheidt CE (2022a) weer verschillende materieeltypen naar inzet (vaste locatie of mobiel), grootte/vermogen en type aandrijving. De activiteit bepaalt het maximaal benodigde motorvermogen en de gemiddelde motorbelasting, en daarmee de vermogensvraag. Daarnaast wordt het materieel een bepaald aantal uur per dag ingezet. De combinatie van het benodigde motorvermogen, de motorbelasting en uren inzet per dag bepaalt de energievraag van het gebruikte materieel. Vanuit monitoringsdata van TNO blijkt dat de gemiddelde motorbelasting sterk kan variëren per type materieel, grofweg tussen de 10% en 40% van het maximale motorvermogen (TNO, 2023). Daarnaast kan dit voor eenzelfde machine variëren per dag, afhankelijk van de activiteit. De uren inzet per dag verschillen sterk voor verschillende machines, dat kan ook nog eens per dag verschillen voor eenzelfde machine. Deze verschillen zijn cruciaal voor de benodigde laadvoorziening. De kans is aanwezig dat er vaak een grotere netaansluiting wordt gerealiseerd dan eigenlijk in de praktijk nodig is.

Dit is niet alleen duurder, maar het kan ook (onnodig) vertragend werken in of voor een bouwtraject. Bovendien zorgt dit voor een onnodig hoge vraag om energie aan het energienetwerk, waardoor er minder beschikbaar is voor andere energievragers.

4. Vervoer van en naar de bouwplaats (van zowel materiaal, materieel en personeel) – als laatste factor die bepalend is voor de uiteindelijke uitstoot van CO₂ en NO_x in en rond een bouwtraject – weliswaar niet op de bouwplaats, maar wel gerelateerd aan de bouwactiviteiten op de bouwplaats – zijn de ritten naar en van de bouwplaats. We onderscheiden hier de aan- en afvoer van materialen (en grond), de aan- en afvoer van materieel, de ritten van personeel dat regelmatig in bestelbussen plaatsvindt (al dan niet met materieel en gereedschappen) van en naar een bouwplaats en de logistiek die nodig is voor het op de juiste plaats krijgen van alternatieve vormen van energie (zoals accu's – die al dan niet elders opgeladen moeten worden). Er wordt gestreefd ook dit vervoer ZE te krijgen; hierbij wordt dan gedacht aan het mogelijk op- of bijladen van e-voertuigen op de bouwplaats, als dit gegeven de energievoorziening aldaar (zie punt 2) mogelijk is. TSL (2021) verdeelt de ritten naar de bouwplaats in acht (bouw)stroomtypes: (1) beton, (2) ruwbouw groot, (3) ruwbouw ladingdragers, (4) bulk, (5) afbouw, (6) afval, (7) materieel en (8) personeel. Hierbij gaat het voor bijna alle bouwstroomtypes (behalve type 8 en een deel van type 5) om zware voertuigen, waarvoor geldt dat de nu beschikbare e-voertuigen vaak een beperkte actieradius hebben, en er dus vaak behoefte is aan laadinfrastructuur op (of in de buurt van) de bouwplaats om dit in de praktijk mogelijk te maken. Indien de laadinfrastructuur hierdoor beter benut kan worden, komt dit ook ten goede aan de business case van de benodigde infrastructuur, maar als hierdoor een grotere netaansluiting nodig is kan het tegenovergestelde het geval zijn.

De uiteindelijke energiebehoefte op de bouwplaats is het resultaat van keuzes die gemaakt worden bij de voorgaande vier factoren. Deze keuzes worden op hun beurt deels weer bepaald door de *opdrachtvoorwaarden* en / of *kaders* die vooraf gesteld worden aan de aannemer. Zoals uit het voorgaande wel blijkt is het een complex geheel met veel verschillende keuzemogelijkheden in tijd die elkaar ook nog eens onderling beïnvloeden. Het is daarom ook niet gek dat, ondanks dat er op een aantal plaatsen wel wordt geëxperimenteerd met ZE bouwplaatsen (of ZE inzet van materieel en vervoersmiddelen op en rond de bouwplaats) er nog veel vragen onbeantwoord zijn. Bovendien is er in alle vier de genoemde factoren ook nog maar beperkte kennis opgedaan in de praktijk op en rond de bouwplaats (wat wel nodig is om goede keuzes te kunnen maken; want bij onzekerheden wordt al snel gekozen voor een grotere aansluitingen waardoor vertraging opgelopen kan worden).

Het TRANSENERGY project focust op *onderzoek* naar de energietransitie op de bouwplaats en dus maar beperkt over het daadwerkelijk tot stand brengen van deze transitie en het realiseren van emissiereducties in de praktijk (gedurende de looptijd van TRANSENERGY). TRANSENERGY wil dus vooral bijdragen door data en ervaringen te verzamelen rond het komen tot een ZE bouwplaats, en de vertaalslag te maken naar wat dit betekent voor andere inspanningen om een ZE bouwplaats te realiseren. Binnen TRANSENERGY worden derhalve geen oplossingen ontworpen (dus geen ontwerponderzoek), maar vooral geleerd van ervaringen in de praktijk, zodat anderen hier wat aan hebben.

1.3 Leeswijzer ‘Gecombineerde deliverables 1.1 en 1.2 TRANSENERGY - Conceptueel model en case study ontwerp’

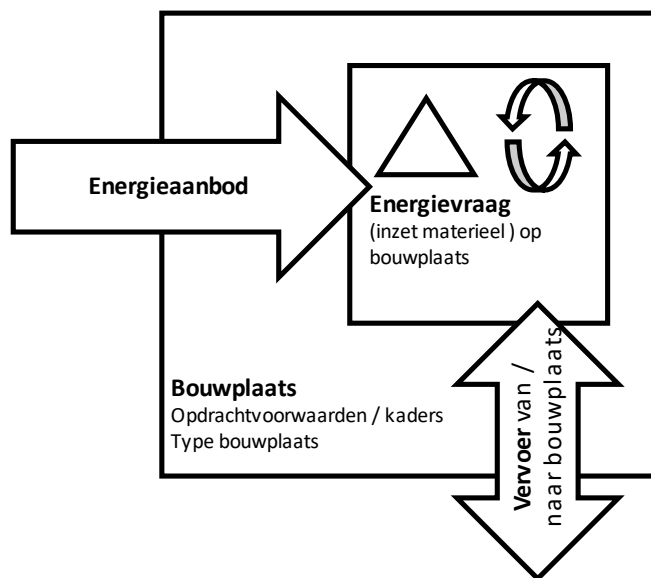
Deze deliverable is de eerste stap. Na de aanleiding en motivatie die in de voorgaande paragrafen is besproken, gaan we in hoofdstuk 2 van dit document in op de opzet van het onderzoek in TRANSENERGY (2.1) en specifiek op het ontwerp van het conceptueel model en de meervoudige case study (2.2). De vier factoren die van belang zijn voor het (gedeeltelijk) realiseren van een ZE bouwplaats, die we in paragraaf 1.2 al kort hebben benoemd, en wat daarvan al bekend is, vormen de basis voor dit model en worden in hoofdstuk 3 verder besproken. Hoofdstuk 4 beschrijft vervolgens het conceptueel model dat we binnen TRANSENERGY willen gebruiken, waarna hoofdstuk 5 ingaat op het ontwerp van de case study (inclusief de dataverzameling en monitoring), dit geeft aan hoe het onderzoek in het vervolg van TRANSENERGY zal plaatsvinden.

2 TRANSENERGY

2.1 TRANSENERGY projectopzet

Binnen TRANSENERGY is gekozen voor een sterke relatie met de *bouwlogistieke praktijk*, door de relatie tussen de in praktijk gerealiseerde energiebehoefte en het gerealiseerde energieaanbod op verschillende typen bouwplaatsen te onderzoeken. Immers, er zijn ondertussen meerdere bouwprojecten in uitvoering en in ontwikkeling waar stappen worden gezet naar de realisatie van ZE bouwplaatsen. Deze ZE bouwplaatsen worden gekenmerkt door aannemers of opdrachtgevers die bewust inzetten op een of meerdere ZE oplossingen (of hierin faciliteren) zonder te weten of de gekozen oplossingen de juiste keuze zijn voor het type project (of voor de omgeving, denk bijvoorbeeld aan netcongestie). Juist door een sterke focus op deze eerste initiatieven van koplopers in de sector te leggen, te analyseren waar de partijen tegenaan lopen en hoe dit opgelost wordt (of zou kunnen worden) kunnen we barrières identificeren die aanleiding zijn voor het nemen van mitigerende maatregelen. Door meerdere verschillende cases te onderzoeken en de lessen hieruit breed te verspreiden draagt het onderzoek bij aan een versnelde toepassing van ZE bouwplaatsen.

Om dit te realiseren maken we gebruik van een (meervoudige) case study onderzoeksstrategie. Binnen deze meervoudige case study is de eenheid van analyse de zero-emissie bouwplaats zoals weergegeven in Figuur 2.1.



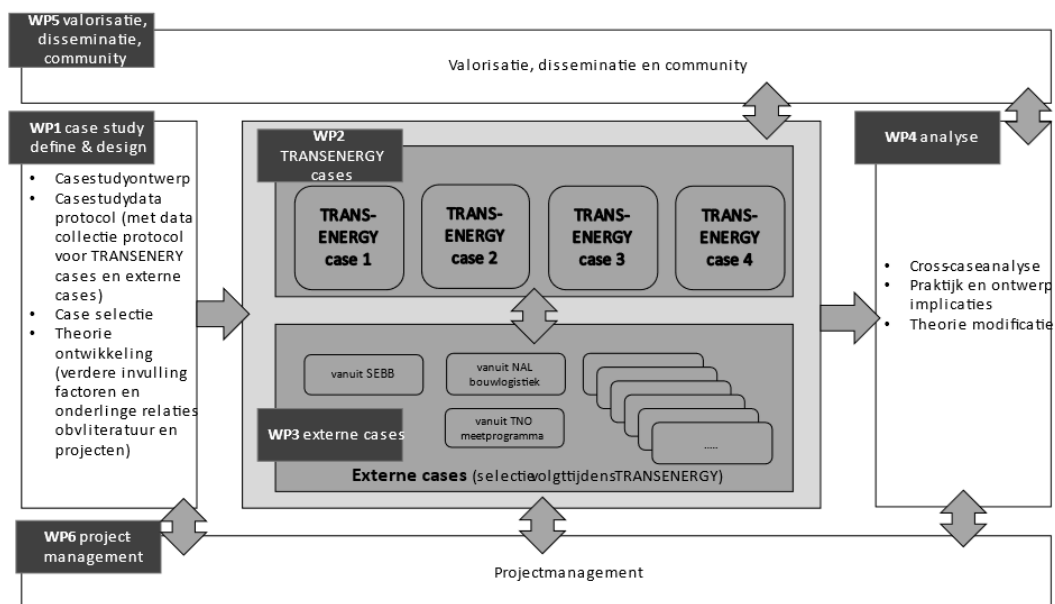
Figuur 2.1: TRANSENERGY eenheid van analyse: bouwplaats

Figuur 2.2 toont de samenhang van de 6 werkpakketten in TRANSENERGY. De werkpakketten 1 tot en met 4 geven gezamenlijk invulling aan de geplande meervoudige case study die we in TRANSENERGY opzetten.

Werkpakketten 5 en 6 gaan over de organisatie van het gehele (onderzoeks)project en de actieve connectie naar partijen binnen en buiten TRANSENERGY en de mogelijkheid om op basis van de resultaten ZE oplossingen te kunnen realiseren in trajecten die buiten het directe TRANSENERGY project vallen.

Binnen de meervoudige case study in TRANSENERGY hebben we verschillende soorten cases (zie Figuur 2.2):

- Vier cases lopen binnen het TRANSENERGY project met partners die ook *actief* zijn binnen het consortium; dat zijn de volgende cases: case Harderwijk, Case SOK verhandingen Amsterdam, case ProRail en case Dijkversterking Tiel-Waardenburg (in WP2).
- Naast de actieve cases worden ook *externe cases* bestudeerd op basis van informatie die wordt verkregen uit andere lopende of reeds afgeronde projecten (in WP3).



Figuur 2.2: Overzicht en samenhang van werkpakketten in TRANSENERGY

2.2 TRANSENERGY werkpakket 1: case study define & design

De TRANSENERGY onderzoeksopzet (WP1 tot en met 4) volgt de case study aanpak zoals beschreven door Yin (2003, p46 en verder). WP1 geeft invulling aan de 'define & design'-fase. Deze deliverable gaat specifiek in op werkpakket 1, maar is ook input voor WP2 en 3 die ingaat op de 'prepare, collect, analyse'-fase, waarin de analyse op individueel case-niveau plaatsvindt. WP4 geeft uiteindelijk invulling aan de 'analyse and conclude'-fase (waar de cross-caseanalyse plaatsvindt, zie ook Dul en Hak, 2008 met name Part III en Part IV).

De cases met TRANSENERGY partners (in WP2) verschillen van de andere cases (in WP3). Binnen de vier cases in WP2 wordt actief praktijkdata verzameld in samenwerking met de TRANSENERGY-partners. Naast deze cases, waar we met de partners gedurende het project actief in betrokken zijn, wordt de eerder genoemde data ook uit andere lopende of reeds afgeronde cases verkregen (in WP3). Deze externe cases worden geselecteerd op basis een aantal criteria (die definitief worden bepaald in het case study ontwerp (zie hoofdstuk 5)): hierbij kun je denken aan verschillende cases met verschillende typen bouwplaatsen,

verschillend inzet ZE materieel, verschillende soorten energieaanbod-oplossingen, etc. maar ook aan databeschikbaarheid en bereidheid mee te werken aan TRANSENERGY⁶. Het gaat hier om zowel ‘oude’ cases (mits goed gerapporteerd) als lopende cases. Datacollectie van deze cases zal bestaan uit meetgegevens (op voorwaarde dat dit binnen de case is gedaan – we gaan zelf niet meten in de externe cases), document- en literatuuronderzoek en / of interviews.

Hierbij is het van belang dat de onderstaande data grotendeels beschikbaar is:

- Technische specificaties van het materieel
- Informatie over de type activiteiten
- Informatie rondom inzetgegevens en data over laadactiviteiten op materieelniveau.

In deze deliverable rapporteren we de resultaten uit activiteiten uit TRANSENERGY WP1, namelijk:

- Activiteit 1.1: theorie-ontwikkeling door verdere uitwerking van de vier factoren en de onderlinge relaties op basis van literatuur en verslagen van praktijkprojecten (bureau-onderzoek). Het aantal verschillende mogelijkheden van typen bouwplaatsen, opties voor ZE-machines en voertuigen, inrichting van de energievoorziening en ZE vervoer is enorm. In de eerste activiteiten brengen we de bestaande kennis in kaart als start van TRANSENERGY op basis van gerapporteerde cases, zie hoofdstuk 3. Uiteindelijk ontwerpen we op basis hiervan een conceptueel model dat we in het vervolg van het traject gebruiken, toetsen en doorontwikkelen (zie ook hoofdstuk 4).
- Activiteit 1.2: case study protocol. In WP1 bepalen we met de partners in de TRANSENERGY-cases (WP2) wat we samen kunnen monitoren in welke periode. Voor de gehele case study (WP2 en WP3) stellen we het case study protocol op basis van de stappen in Rashid et al., 2019 en Voss et al (2002; 2015) en we bepalen case-selectiecriteria voor de externe cases in WP3.

We hebben er voor gekozen om in deze rapportage het grootste deel van het werk uit WP1 gecombineerd te rapporteren en dit niet in twee lossen deliverables te doen, zoals oorspronkelijk gepland was, namelijk:

- D1.1 Conceptueel model (inclusief onderbouwing) (M4)
- D1.2 Case study ontwerp (met: case study protocol, case selectie criteria, data collection protocols) (M6)

Het gecombineerd rapporteren geeft de mogelijkheid om enerzijds een deliverable te maken waarbij ook ruimte is voor de achtergrond, aanleiding en motivatie van het TRANSENERGY onderzoek en anderzijds voorkomt het onnodig verwijzen tussen 1.1 en 1.2, aangezien het eigenlijk tegelijkertijd is gemaakt.

⁶ Er is voor gekozen om deze externe cases (althans de bedrijven) niet op te nemen in het TRANSENERGY consortium; de inbreng van deze partijen beperkt wat (voor hen en de penvoerder) niet opweegt tegen de administratieve eisen. Hierdoor is er een projectrisico: deze bedrijven hebben zich namelijk nog niet gecommitteerd aan medewerking met TRANSENERGY. Op basis van gesprekken in de voorstelfase, en op basis van ervaringen met bouwprojecten hebben we wel er vertrouwen in dat we voldoende relevante cases vinden voor WP3 (mede in samenwerking met SSEB, het TNO meetprogramma bouwlogistiek, NAL bouwlogistiek en de stuurgroep Bouw en mobiele werktuigen van Topsector Logistiek).

3 Definiëren en ontwerpen: belangrijke factoren

3.1 Inleiding en verantwoording

Allereerst, we gebruiken verschillende termen door elkaar met betrekking tot de vier factoren (zie Figuur 1.1 en Figuur 2.1); denk bijvoorbeeld aan energiebehoefte of energievraag, waarmee we in deze deliverable hetzelfde bedoelen, namelijk de energie die nodig is op de (ZE) bouwplaats om de activiteiten daar te kunnen doen. We hebben er voor gekozen om dit voor het moment zo te laten omdat we juist ook in de cases op zoek willen gaan naar alle elementen die van belang zijn in deze factoren. Een te enge definitie zou kunnen leiden tot het (onterecht) niet meenemen van bepaalde elementen omdat die in een case onder een andere term worden gerapporteerd. Uiteindelijk is ons doel wel – in een latere fase van TRANSENERGY – tot eenduidige terminologie te komen, maar voor nu gebruiken we dus verschillende termen door elkaar.

De vier factoren die van belang zijn om te komen tot een ZE bouwplaats komen voort uit verschillende kennisgebieden die (fysiek) samenkomen op de bouwplaats. Zo gaat het bij energieaanbod om kennis rond laadinfrastructuur, manieren van energie-opwekking, energietransport en -netwerk vragen, energieopslag, etc. Bij de energiebehoefte gaat het – naast de organisatie en planning van de inzet van de middelen – ook om de ontwikkeling van ZE middelen en het daadwerkelijke gebruik ervan. Het type bouwplaats en de typen bouwactiviteiten vallen meer in de traditionele bouw kennis, terwijl de factor vervoer meer in het transportdomein zit. We bekijken in de volgende paragrafen kort welke relevante informatie er is rond de factoren, om die dan in het volgende hoofdstuk tot een conceptueel model te verwerken dat in de rest van het TRANSENERGY project als uitgangspunt kan worden gebruikt.

3.2 Van factoren naar conceptueel model

Allereerst worden de verschillende keuzemogelijkheden binnen de vier factoren uitgewerkt; deze vier factoren (zie Figuur 1.1 en Figuur 2.1) en waarom ze van belang zijn is al kort behandeld in paragraaf 1.2. Om te komen tot een conceptueel model dat gebruikt kan worden in de case study onderzoeken we de belangrijkste elementen, relaties en keuze- of ontwerp- of stuurmogelijkheden in deze vier factoren die we mee moeten nemen in de verschillende cases.

3.2.1 Energieaanbod

De eerste factor is het energieaanbod. Netcongestie is momenteel een probleem in de energietransitie, waardoor verschillende ZE doelen – waaronder bijvoorbeeld zero-emissie stadslogistiek door de invoering van ZE zones in binnensteden – een probleem zijn. Het gaat hierbij om het niet kunnen krijgen van een voldoende zware netaansluiting om bijvoorbeeld vloten van vrachtwagens te kunnen laden. De Capaciteitskaart afname elektriciteitsnet geeft een duidelijk beeld van de tekorten aan transportcapaciteit op het elektriciteitsnetwerk.

Uit onderzoek van de netbeheerder blijkt dat er geen transportcapaciteit is voor het gevraagde (extra) transportvermogen ⁷. Merosch en CE Delft (2024) schetsen een zevental oplossingen voor netcongestie bij bedrijven, die overigens niet alleen gaan over het energieaanbod (hierin zie je ook de verbondenheid van de vier factoren uit Figuur 2.1), maar variëren van energieopslag, conversie, samenwerking en gedeelde aansluitingen (zie Merosch en CE Delft, 2024). Sommige van deze oplossingen zouden ook kunnen werken om problemen met het energieaanbod rond bouwplaatsen te verminderen, maar wat de bouwplaatsen anders maakt, is dat het hier gaat om tijdelijke activiteiten zowel in tijd als in plaats, dus ook om een tijdelijke (piek)vraag naar energie.

Deze tijdelijkheid zorgt zo wel voor ruimte in de oplossingen om te komen tot een voldoende energieaanbod, zoals blijkt uit het voorbeeld in Binnenlands Bestuur (zie Kronenberg, 2024), waar op verschillende manieren wordt gezocht naar hoe bestaande laadinfrastructuur in kaart kan worden gebracht en (tijdelijk) beschikbaar kan worden gesteld voor bouwlogistieke activiteiten of bouwplaatsen. NKL heeft op dit gebied ook een handreiking en eisenstet voor veilig gebruik openbare laadpalen in de bouw opgesteld, zie NKL (2023ab). Aan de andere kant is het goed regelen van energieaanbod voor trajecten die niet altijd op dezelfde plek plaatsvinden – denk bijvoorbeeld aan een grond-, water- en wegenbouwproject – weer extra lastig, zie RWS (2022) voor meer informatie.

Op hoofdlijnen – want in de verschillende cases, dat is pas later in het TRANSENERGY onderzoek, gaan we heel specifiek op de verschillende individuele mogelijkheden in – zien we dat voor de factor energieaanbod bij een (deels) emissieloze bouwplaats er verschillende keuzes gemaakt worden rondom de opwekking en opslag van energie.

Allereerst, zijn er verschillende manieren om energie voor bouwmachines en -voertuigen op te slaan:

1. In vaste accupakketten;
2. In verwisselbare accupakketten (als deze type accu's op een machine leeg zijn, dan kunnen ze verwisseld worden door een volle verwisselbare accu);
3. In een batterijcontainer;
4. In een waterstoftank-/container.

Een voorbeeld van verschillende schone energiesystemen die een flexibele, emissievrije energiebron voor bouwprojecten zijn, is te vinden via de marktplaats van TRANSENERGY-partner Skoon, denk hierbij aan waterstof-, hybride, zonne-energie-generatoren en / of batterijen of accu's.

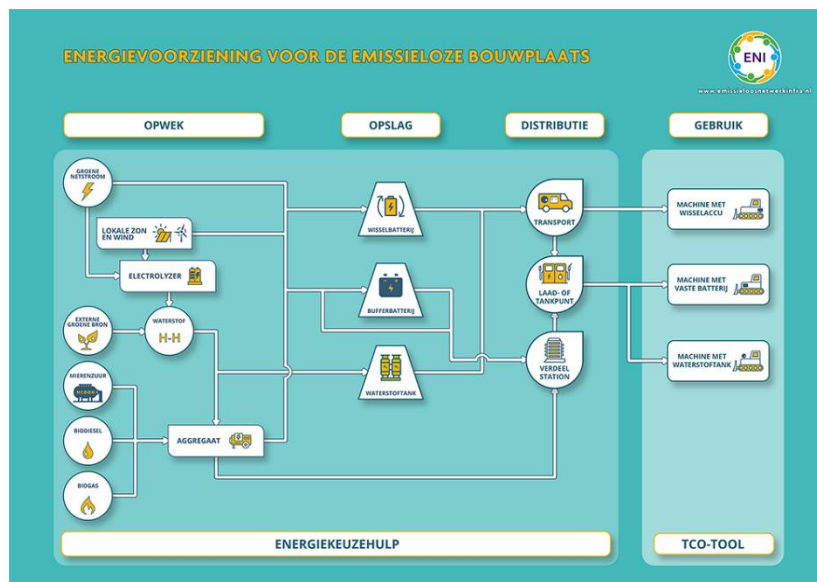
Elk van deze opties kan worden gezien als een energieopslagsysteem. De accupakketten en batterijcontainers kunnen op verschillende manier van energie worden voorzien, namelijk:

1. Via een directe netaansluiting (waarbij er weer tal van verschillende mogelijkheden – afhankelijk van bijvoorbeeld het type bouwplaats, de omgeving en de beschikbare bestaande en deelbare laadinfrastructuur en natuurlijk de mate van congestie op het netwerk – zijn, zie ook Merosch en CE Delft, 2024).
2. Via een aggregaat waar een duurzame brandstof wordt omgezet in elektriciteit;
3. Via wind- of zonne-energie.

Om waterstof om te zetten naar elektrische stroom is er een brandstofcel nodig of een waterstofaggregaat.

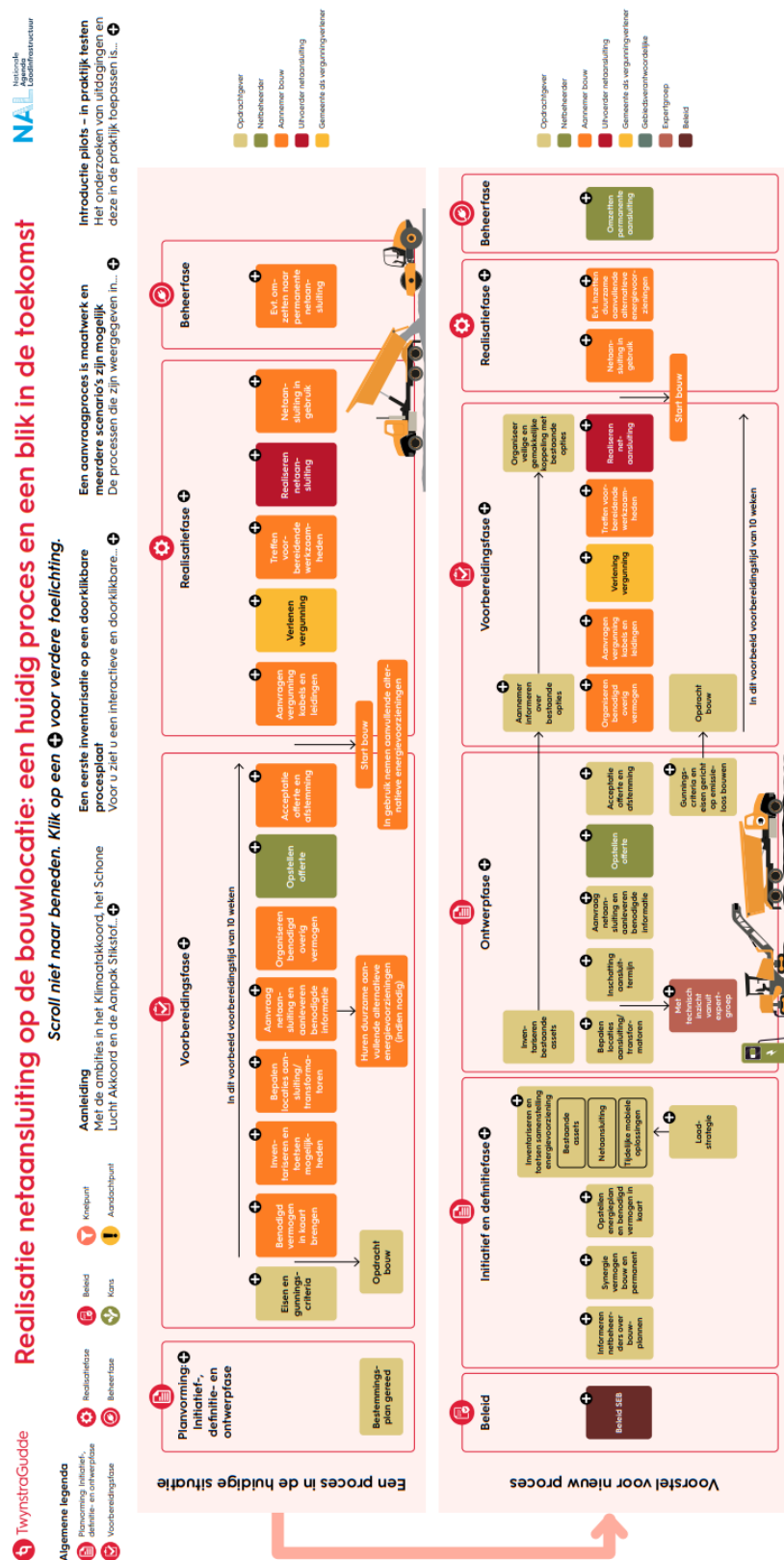
⁷ <https://capaciteitskaart.netbeheernederland.nl/>

ENI (2022) heeft, naast een tool voor energiekeuzehulp (om inzicht te krijgen in de energiebehoefte op de bouwplaats) ook een infographic gemaakt om de huidige kennis op het gebied van energievoorziening voor de emissieloze bouwplaats in beeld te brengen (zie Figuur 3.1). Daarbij wordt de verbinding gelegd tussen opwek, opslag, distributie en gebruik van energie. Deze infographic staat aan de basis van het conceptueel model dat we in hoofdstuk 4 verder ontwikkelen.



Figuur 3.1: ENI (2022) infographic 'energievoorziening voor de emissieloze bouwplaats'

Daarnaast is er ook de procesplaat elektrisch laden op de bouwlocatie beschikbaar. Deze plaat (zie Figuur 3.2) met toelichting schetst zowel het huidige als toekomstig proces met betrekking tot de realisatie van een netaansluiting op de bouwlocatie. Naar aanleiding van verschillende pilots waarin deze procesplaat is getest is die in 2024 aangepast (zie NAL, 2024).



Figuur 3.2: Procesplaat elektrisch laden op de bouwlocatie (NAL, 2024 – toelichting is beschikbaar bij de verschillende stappen in de plaat)

3.2.2 Energiebehoefte

Natuurlijk is ook de energiebehoefte weer afhankelijk van het type bouwplaats en de geplande activiteiten. Op de bouwplaats kan er onderscheid worden gemaakt naar verschillende energiegebruikers die invloed hebben op de energiebehoefte op de bouwplaats, namelijk:

- De bouwmachines;
- De voertuigen voor transporten van bouw materiaal, -materieel en -personeel;
- De bouwkeet.

Zoals NAL (2023ab) aangeeft is de beschikbaarheid van een goede laadinfrastructuur – zoals we in paragraaf ‘3.2.1 Energieaanbod’ besproken – een belangrijke uitdaging voor een ZE bouwplaats. NAL (2023ab) heeft een tool ontwikkeld om de energiebehoefte te kunnen bepalen op een bouwplaats, om een inschatting te kunnen maken van de nodige vermogensvraag op de bouwplaats. De ontwikkelde vermogenstool heeft als doel het nodige vermogen voor de meest voorkomende binnenstedelijke bouwprojecten eenvoudig in kaart te brengen. Met de vermogenstool is een inschatting te maken van de energievraag voor de volgende type werkzaamheden: rioolrenovatie, herinrichting straten, nieuw asfalt, sloopwerk, en funderingswerkzaamheden. De tool wordt op basis van opgedane ervaring geüpdatet, zodat de energiebehoefte van verschillende bouwmachines zo goed mogelijk klopt met de technische ontwikkelingen ervan.

Bouwmachines zijn de grootste energiegebruikers op een bouwplaats. De totale energiebehoefte van bouwmachines wordt bepaald door het aantal en typen bouwmachines en hun inzetprofielen. Naast de energiebehoefte van (ZE) bouwmachines is ook de manier waarop bouwmachines van energie worden voorzien van invloed op keuzes die worden gemaakt op het gebied van energieaanbod.

Daarin zijn verschillende mogelijkheden:

- 1) Via een verwisselbaar accupakket (batterij-elektrisch materieel);
- 2) Via een vast accupakket (batterij-elektrisch materieel);
- 3) Via een stroomkabel (kabel-elektrisch materieel);
- 4) Via een waterstoftank (materieel met een waterstofverbrandingsmotor).

Optioneel kunnen ook elektrische voertuigen die materialen, materieel of energiedragers naar de bouwplaats brengen of waarmee het bouw personeel naar de bouwplaats komt op de bouwplaats worden geladen. Het aantal en typen voertuigen en de duur van laden bepalen de totale energievraag. Vanzelfsprekend is de duur afhankelijk van het type rit en voertuig, zo zal een bestelbus die de hele werkdag op een bouwplaats geparkeerd staat een hele andere energiebehoefte hebben dan een vrachtwagen die een lading komt lossen en dan weer verder moet.

3.2.3 Type bouwplaats

De energiebehoefte op een bouwplaats is afhankelijk van het type bouwplaats. Er bestaat een grote diversiteit aan type bouwplaatsen, waarin onder andere de type werkzaamheden/bouw, de projectgrootte en de locatie van een bouwproject een rol spelen.

Type werkzaamheden

De bouwsector wordt door het CBS in drie hoofdbranches opgedeeld:

1. De Burgerlijke- en Utiliteitsbouw (B&U);
2. Grond-, Water- en Wegenbouw (GWW);
3. Gespecialiseerde bouw.

B&U bestaat uit de bouw (het bouwen, renoveren en onderhouden) van woningen en bedrijfsgebouwen, zoals kantoren, winkels, ziekenhuizen en hotels. GWW werkt aan de bouw en het onderhoud van infrastructurele werken, zoals (spoor)wegen, civiele kunstwerken, kabels en buisleidingen en baggerwerkzaamheden. De gespecialiseerde bouw omvat sloop- en graafwerkzaamheden, installatie van elektriciteit, verwarming en sanitair en de afbouw van een B&U bouwproject ((zoals stuken, metselen en schilderen), zie CBS, 2023. Tabel 1 geeft per hoofdbranche de type bouwplaatsen weer die kunnen worden onderscheiden (deels gebaseerd op de indeling die het Economisch Instituut voor de Bouw (EIB, 2021) aanhoudt bij haar jaarlijkse onderzoek naar de bedrijfseconomisch situatie van bouwbedrijven in Nederland).

Tabel 1: Type bouwplaatsen per hoofdbranche

Burgerlijke- en Utiliteitsbouw	Grond-, Water- en Wegenbouw	Gespecialiseerde bouw
Nieuwbouw woningen	Nieuwbouw wegen (verhardingen)	Sloop- en graafwerkzaamheden
Nieuwbouw gebouwen	Onderhoud wegen (verhardingen)	Installaties
Onderhoud en renovatie woningen	Kabel- en pijpleidingen	Afwerking van gebouwen
Onderhoud en renovatie gebouwen	Civiele kunstwerken	
	Kust en oever (waterbouw)	
	Baggerwerk (waterbouw)	

SEB (2023) maakt een iets ander onderscheid als het om het definiëren van de type bouwplaats gaat, hier worden de volgende deelsectoren onderscheiden:

- **Weg, dijk en spoor** – inzet van bouwmaterieel en -transport binnen de GWW en Spoor, zoals aanleg, beheer en onderhoud van wegen, bruggen, tunnels, dijken, dammen, spoorwegen, stations etc.;
- **Woning- en utiliteitsbouw** – inzet van bouwmaterieel en – transport aan gebouwen met een woonbestemming (woningbouw) of zonder woonbestemming (utiliteitsbouw), zoals kantoren, scholen, winkels, etc.;
- **Kustlijnzorg en vaargeulonderhoud** – inzet van varend materieel voor kustlijnzorg, vaargeulonderhoud en overige baggerwerkzaamheden;
- **Energie** – inzet van bouwmaterieel – en transport voor de aanleg van projecten voor energieopwekking en energie-infrastructuur, bijvoorbeeld de aanleg van windparken op zee of energie-opwerklocaties op het land.

De eerder genoemde studie van NAL (2023ab) onderscheidt weer net iets andere type werkzaamheden (en daarbij horende bouwplaatsen): rioolrenovatie, herinrichting woonstraat, asfaltering bestaande weg, bouwrijp maken terrein voor 20 woningen, sloopwerk bestaand gebouw en funderingswerken hoogbouw.

Projectgrootte

De grootte van een bouwproject is ook belangrijk voor de energiebehoefte en -aanbod op de bouwplaats; vanzelfsprekend hangt de energiebehoefte af van de grootte van het bouwproject, maar de manier waarop dit gemanaged wordt is uiteindelijk ook bepalend; juist in grote trajecten is er meer ruimte om te sturen, terwijl in kleinere trajecten wellicht de oplossingen meer te vinden zijn in slim gebruik maken van beschikbare (openbare) laadpunten, zoals bijvoorbeeld was beschreven in Kronenberg (2024).

Ook is de vraag hoe je precies projectgrootte gaat definiëren: dit kan in geld, aantal woningen/appartementen, aantal mensen, oppervlakte, looptijd, etc., maar onafhankelijk van de manier van definiëren, de projectgrootte heeft invloed.

Locatie

De locatie van bouwprojecten kan invloed hebben op de opties voor energieaanbod. Dit is daarom een relevant kenmerk om mee te nemen bij typering van bouwplaatsen.

Voor de locatie wordt een vergelijkbare indeling gebruikt die het EIB (2021) hanteert in haar studie naar mogelijkheden voor bouwlocaties en die ook voorkomt in veel beleidsstukken, namelijk:

- Binnenstedelijk (binnen bestaand bebouwd gebied);
- Buitenstedelijk (buiten bestaand bebouwd gebied).

Daarnaast zijn andere locatiekenmerken voor het TRANSENERGY-onderzoek interessant, zoals beschikbaarheid netwerkcapaciteit (niet overal is congestie), bereikbaarheid, etc.

3.2.4 Vervoer van en naar de bouwplaats (van zowel materiaal, materieel en personeel)

Naast emissies door activiteiten op de bouwplaats, zorgen de activiteiten op de bouwplaats – het bouwproject – ook voor emissies door het vervoer van en naar de bouwplaats. Het gaat hierbij om aanvoer en afvoer van materialen en grondverzet, om de aan- en afvoer van materieel dat op de bouwplaats gebruikt moet worden en het vervoer van mensen van en naar de bouwplaats die hier werken. Tabel 2 geeft een overzicht van de verschillende stromen naar (en weer vanaf) de bouwplaats met een indicatie van het soort voertuigen dat hiervoor wordt gebruikt. Ook de logistiek die nodig is voor het op de juiste plaats krijgen van alternatieve vormen van energie (zoals accu's – die al dan niet elders opgeladen moeten worden) staat hier nog niet in, maar dit wordt wel belangrijk op een ZE bouwplaats.

Tabel 2: Onderverdeling (bouw) stroomtypes en veel gebruikte voertuigen (TSL, 2021)

Type stroom	Omschrijving	Hedendaags meest gebruikte voertuigen
1. Beton	Dit gaat om vloeibare beton dat gestort wordt vanuit een betonmixer op de bouwplaats. Circa 30% van de ritten in het traditionele scenario is toe te wijden aan dit bouwstroomtype.	
2. Ruwbouw Groot	Grotere en zwaardere elementen, zoals prefab, heipalen, vloerelementen, etc. Circa 10% van de ritten in het traditionele scenario is toe te wijden aan dit bouwstroomtype.	 
3. Ruwbouw Ladingdragers	Kleinere elementen op bokken/pallets, bijvoorbeeld geveldelen, puien, glasplaten, etc. Circa 10% van de ritten in het traditionele scenario is toe te wijden aan dit bouwstroomtype.	 
4. Bulk	Bijvoorbeeld grond of grind. Circa 0% van de ritten in het traditionele scenario is toe te wijden aan dit bouwstroomtype.	
5. Afbouw	Afbouw, installaties en kleinere bouwmaterialen vervoerd op pallets of in containers. Circa 35% van de ritten in het traditionele scenario is toe te wijden aan dit bouwstroomtype.	  
6. Afval	Bouw- en sloofafval, maar ook verpakkingsmaterialen en emballage. Circa 5% van de ritten in het traditionele scenario is toe te wijden aan dit bouwstroomtype.	
7. Materieel	Bijvoorbeeld bouwmachines, bouwkransen en steigers. Circa 10% van de ritten in het traditionele scenario is toe te wijden aan dit bouwstroomtype.	
8. Personeel	Vervoer van personeel van en naar de bouwplaats.	

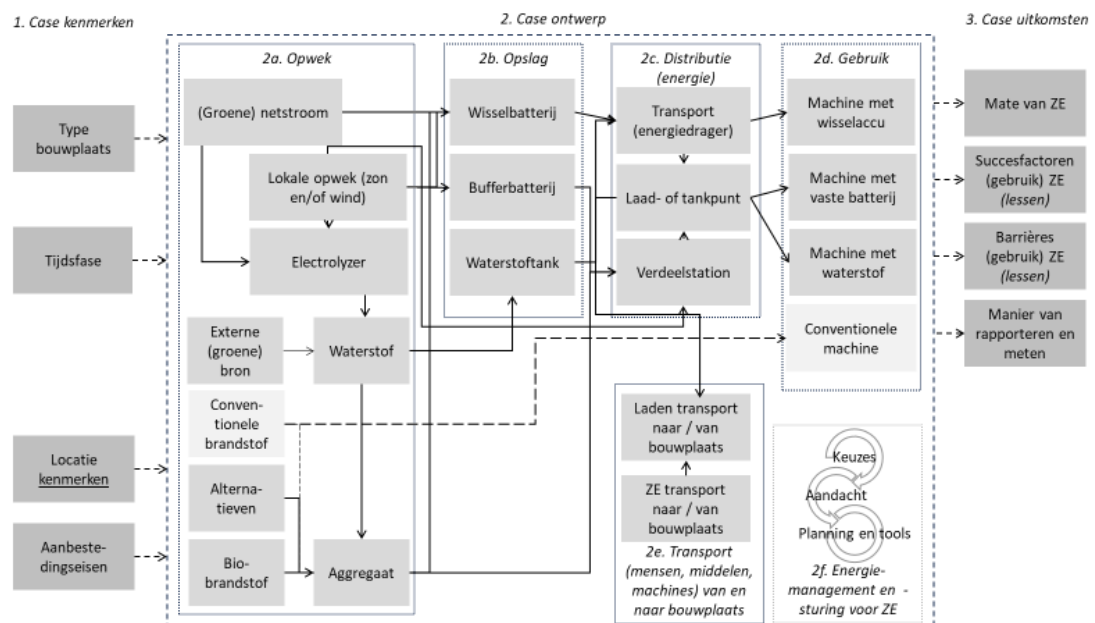
Er zijn al vrij veel studies naar mogelijke manieren om de bouwlogistiek van en naar de bouwplaats zo te organiseren dat er minder vervoersbewegingen nodig zijn en daarmee dus ook minder emissies worden uitgestoten. Een vrachtwagen- of bestelbusbeweging die niet plaatsvindt, stoot immers geen emissies uit. Een veel genoemde oplossing om de hoeveelheid bouwlogistiek verkeer rond de bouwplaatsen (en de omgeving) te verminderen is een zogenaamde bouwhub (zie bijvoorbeeld TSL, 2020; TNO, 2024). Zonder al te ver in te gaan op de voor- en nadelen van een bouwhub, kan deze oplossing zorgen voor consolidatie van sommige bouwstromen op het laatste deel van het vervoer van en naar de bouwplaats – waardoor minder voertuigen nodig zijn voor dit laatste deel van het vervoer wat kan leiden tot minder bouwverkeer in de buurt van de bouwplaats. Een bijkomend voordeel is dat het vervoer vanuit de hub eventueel geschikt is voor elektrificatie (omdat het korte afstanden zijn tussen de hub en de bouwplaats, het dus binnen de beperkte actieradius van e-vrachtwagens past en het voertuig kan opladen bij de bouwhub). Als er bij een ZE bouwplaats wordt gestreefd naar ZE vervoer van en naar de bouwplaats moet er – naast een bouwhub-oplossing, waar lading van conventionele voertuigen kan worden overgeslagen op ZE voertuigen - gedacht worden aan het mogelijk op- of bijladen van e-voertuigen op de bouwplaats (als dit gegeven de energievoorziening aldaar mogelijk is). Hierbij gaat het voor bijna alle stroomtypes (behalve type 8 en een deel van type 5 in Tabel 2) om zware voertuigen, waarvoor geldt dat de nu beschikbare e-voertuigen vaak een beperkte actieradius hebben, en er dus vaak behoefte is aan laadinfrastructuur op (of in de buurt van) de bouwplaats om dit in de praktijk mogelijk te maken. Indien de laadinfrastructuur hierdoor beter benut kan worden, komt dit ook ten goede aan de business case van de benodigde infrastructuur, maar als hierdoor een grotere netaansluiting nodig is kan het tegenovergestelde het geval zijn. Maar ook voor de bestelbussen (type 8 en een deel van type 5 in Tabel 2) geldt dat mogelijke laadinfrastructuur wenselijk is. Bestelbussen worden niet alleen gebruikt als mobiele werkplaats en opslag van gereedschappen, maar ook voor het woon-werkverkeer van mensen die werken op bouwplaatsen en gegeven de soms aanzienlijke afstanden die deze bestelbussen maken, is tijdens de werkdag bijladen soms geen overbodige luxe. Het type aansluiting dat nodig is om het mogelijk te maken voor groot materieel om in een korte tijd te snelladen is echter wel van een hele andere orde dan het langzaam laden van een bestelbus gedurende een langere periode op de dag.

Kortom, als ook het vervoer van en naar de bouwplaats ZE moet zijn, heeft dit verschillende consequenties. Niet alleen moet er dan aan de energieaanbod-kant iets gebeuren, ook in de logistieke organisatie zouden er – bijvoorbeeld in de vorm van een bouwhub – veranderingen moeten worden doorgevoerd, zodat de energiebehoefte van het vervoer op de bouwplaats een niet al te groot beslag gaat leggen op de beschikbare energie. Op dit moment zijn er wel enkele voorbeelden van grote ZE voertuigen, zie bijvoorbeeld IenW, 2022, die het transport van en naar de bouwplaats emissievrij verzorgen, maar dit betreft echt nog slechts enkele voorbeelden. Met uitzondering van een beperkt deel van de ritten (vooral in type 8 en een deel van type 5 – namelijk bestelbussen en bijvoorbeeld een aantal vrachtwagenritten vanaf groothandels in Tabel 2) is er nauwelijks ZE vervoer van en naar de (ZE)bouwplaats en zijn de gebruikte voertuigen grotendeels afhankelijk van dieselaandrijving.

4 Conceptueel model

4.1 TRANSENERGY conceptueel model

Op basis van eerdere studies (zie hoofdstuk 3) hebben we het conceptueel model opgesteld (Figuur 4.1), dat we gaan gebruiken om de verschillende cases te beschrijven, classificeren en uiteindelijk ook de cross-case analyse uit te voeren. Hierbij zijn de factoren die we in hoofdstuk 3 hebben besproken te vinden in het tweede blok (*case ontwerp*) en zijn de blokken 1 en 3 veel meer om enerzijds de context – zie blok 1 *case kenmerken* – en de resultaten – zie blok 3 *case uitkomsten* – van de case te kunnen relateren aan de samenstelling en invulling van de eerder genoemde factoren, zie Figuur 4.1.



Figuur 4.1: TRANSENERGY conceptueel model voor case study ontwerp

Het conceptueel model bestaat uit drie verschillende delen (van links naar rechts):

1. Case kenmerken (1);
2. Case ontwerp (2, met onderdelen *a.* opwek, *b.* opslag, *c.* distributie (energie), *d.* gebruik, *e.* transport (mensen, middelen, machines) van en naar de bouwplaats en *f.* energiemangement en -sturing voor ZE;
3. Case uitkomsten (3).

Het case ontwerp, dat is de manier waarop het energieaanbod – op basis van de verwachte of gerealiseerde energievraag – op de (zero emissie) bouwplaats wordt voorzien, is het grootste deel van het conceptueel model. De andere delen gaan vooral over de context (de case kenmerken) waarbinnen het bouwproject plaatsvindt en de resultaten, specifiek op het gebied van ZE bouw, die volgen uit de case. De volgende sub paragrafen gaan verder in op deze drie delen. Hierin delen we de drie delen op in verschillende blokken, waarvoor we ook een classificatie geven (waar mogelijk).

Deze classificatie is voorlopig; mocht bij de case-beschrijving blijken dat er zaken ontbreken of anders kunnen worden ingedeeld, dan kunnen we de classificaties aanpassen op basis van voortschrijdend inzicht.

4.2 Case kenmerken

Type bouwplaats

Voor de type bouwplaats maken we een combinatie van SEB (2023), CBS (2023) en EIB (2021):

1. De Burgerlijke- en Utiliteitsbouw (B&U), waaronder woning- en utiliteitsbouw (SEB, 2023):
 - B&U - Nieuwbouw woningen
 - B&U - Nieuwbouw gebouwen
 - B&U - Onderhoud en renovatie woningen
 - B&U - Onderhoud en renovatie gebouwen
2. Grond-, Water- en Wegenbouw (GWW), waaronder weg, dijk en spoor, en kustlijn en vaargeulonderhoud (SEB, 2023):
 - GWW - Nieuwbouw wegen (verhardingen)
 - GWW - Onderhoud wegen (verhardingen)
 - GWW - Kabel- en pijpleidingen
 - GWW - Civiele kunstwerken
 - GWW - Kust en oever (waterbouw)
 - GWW - Baggerwerk (waterbouw)
3. Gespecialiseerde bouw, waaronder energie (SEB, 2023):
 - Gespecialiseerde bouw - Sloop- en graafwerkzaamheden
 - Gespecialiseerde bouw - Installaties
 - Gespecialiseerde bouw - Afwerking van gebouwen
 - Energie - projecten voor energieopwekking en energie-infrastructuur.

Tijdsfase

Voor de tijdsfase volgen we NAL (2024), zie Figuur 3.2. Let wel, het kan zijn dat voor een case een verschillend ontwerp (zie 4.3 case ontwerp) wordt gemaakt voor verschillende realisatiefases; zo kan er voor fases met een hoge energievraag meer tijdelijke opslag worden gerealiseerd. Mochten er echt verschillen zitten tussen de ontwerpen in verschillende fases, zou een bepaalde case meerdere malen meegenomen kunnen worden in de analyse (voor elk ontwerp separaat).

- Planvorming
 - o beleid
 - o initiatief en definitiefase
 - o ontwerpfase
 - o voorbereidingsfase
- Realisatiefase (let op in deze fase kunnen verschillende ontwerpen komen, afhankelijk van de (bouw)activiteiten op dat moment). Realisatiefase is voor energiebehoefte de belangrijkste en kan nog worden onderverdeeld in verschillende fases: sloop, grondwerk, fundering, ruwbouw en afbouw
- Beheerfase

Locatiekenmerken

Op basis van EIB (2021) maken we onderscheid tussen:

- Binnenstedelijk (binnen bestaand bebouwd gebied);
- Buitenstedelijk (buiten bestaand bebouwd gebied).

Naast dit onderscheid kijken we ook of er ruimte is op de bouwlocatie (op locaties zonder ruimte / met beperkte ruimte wordt bijvoorbeeld eerder een bouwhub gebruikt en wordt er ook meer gepland om de beperkte ruimte zo goed mogelijk te kunnen gebruiken).

Daarnaast vallen in dit blok nog een aantal andere kenmerken, zoals 'grootte' van het bouwproject (uitgedrukt in geld, hectare: namelijk: ramingskosten en bruto vloeroppervlakte en andere kenmerken die te vinden zijn in de casebeschrijvingen).

Aanbestedingseisen

Voor de cases kijken we ook in hoeverre zero-emissie heeft meegespeeld in de aanbesteding van het bouwproject.

Hierbij maken we gebruik van de instrumenten zoals beschreven door PIANOo (2022):

- o Milieukostenindicator (MKI)
- o CO₂ Prestatieladder
- o AERIUS berekening
- o Opgave inzet bouwmaterieel
- o Europese emissienormen
- o Plan van Aanpak
- o Open post
- o Het Nieuwe Draaien

In de praktijk, geeft PIANOo (2022) aan, komen de instrumenten in verschillende uitwerkingsvormen voor en vaak worden ze ook gecombineerd toegepast. In dit blok kijken we dus vooral naar of ZE een rol speelt / heeft gespeeld in de aanbesteding en zo ja, welke instrumenten hiervoor dan zijn gebruikt.

4.3 Case ontwerp

De blokken in het tweede deel – case ontwerp – en ook de relaties tussen de verschillende blokken volgen in hoofdlijnen het model van ENI (2022), zie ook Figuur 3.1. Dit is deels aangepast op basis van inzichten en gesprekken in de eerste fase van TRANSENERGY mede omdat het doel van ENI (2022) en ons doel enigszins verschilt. ENI (2022) had als doel met deze infographic de verbinding tussen opwekking, opslag, distributie en gebruik in beeld te brengen. Voor TRANSENERGY zijn de blokken '2e. Transport van en naar bouwplaats' en '2f. Energiemanagement en -sturing voor ZE' toegevoegd, daarnaast zijn er kleine wijzigingen en / of toevoegingen, zoals 'conventionele brandstoffen', omdat verschillende cases nog niet gaan over een totale ZE bouwplaats, maar om een gedeeltelijke ZE bouwplaats – vaak omdat het in de praktijk nog niet lukt om volledig ZE te zijn.

4.3.1 Opwekking

Er zijn verschillende manieren waarop energie op de bouwplaats kan komen, die worden in de blokken onder 2. Opwekking (Figuur 4.1) weergegeven. Machines (en eventueel transport van en naar de bouwplaats) hebben energie nodig, dit kan komen van:

- (groene) netstroom, dan is er een netaansluiting nodig; het is de vraag (gegeven de locatie en de netcongestie) of dat mogelijk is en hoe groot die aansluiting zal zijn. Laadpunten horen hier ook bij, deze kunnen op of buiten de bouwplaats zijn. Om bij laadpunten te komen is transport nodig, zeker als de laadpunten verder verwijderd zijn van de inzet van het materieel kan aanvullend transportmaterieel noodzakelijk zijn.

- lokale opwekking kan komen vanuit zonnepanelen of windenergie.
- waterstof wordt ook genoemd als mogelijke energiebron (al dan niet vanuit de lokale opwekking via een elektrolyzer) of extern aangevoerd. Groene waterstof is op dit moment nog niet breed beschikbaar, dus de vraag is in hoeverre dit een veel voorkomende vorm van energievoorziening zal zijn in de praktijk van ZE bouwplaatsen.
- een aggregaat kan ook voor energie zorgen, hiervoor is brandstof nodig. Alternatieve brandstoffen, zoals mierenzuur (ENI, 2022) zijn hiervoor mogelijk, maar ook de niet (volledige) ZE mogelijkheden, zoals biobrandstoffen of zelfs conventionele brandstoffen om bijvoorbeeld bepaalde piekvraag op te vangen, of voor de momenten dat er te weinig energie vanuit de lokale opwekking komt. Dit is echter geen volledige ZE oplossing, maar maakt wellicht de gedeeltelijke ZE bouwplaats wel haalbaar.

Vanuit de verschillende vormen van opwekking gaat energie naar of opslag of distributie. De conventionele lijn gaat direct naar de machines in dit model, vanzelfsprekend zou hier ook een tankpunt tussen kunnen zitten, maar het tankpunt in 2c. distributie gaat specifiek in op de inrichting van de ZE bronnen. Conventionele bronnen en machines worden wel beschreven in de case, maar liggen buiten de scope (de ZE bouwplaats): doel van het wel beschrijven is vooral om een reëel beeld te kunnen scheppen over wat er nu wel en niet mogelijk is en waarom.

4.3.2 Opslag

Energie kan worden opgeslagen, we onderscheiden hier de volgende vormen (op basis van ENI, 2022):

- Wisselbatterij: de wisselbatterij kun je zien als een batterij die opgeladen wordt in een soort docking station, en die als die vol is wordt geplaatst in het materieel (dat zijn dus machines met wisselaccu's).
- Bufferbatterij: de bufferbatterij is een soort hele grote batterij – denk aan de vorm van een container – waar verschillende materieel aan kan opladen (en bijvoorbeeld lokaal opgewekte energie kan worden opgeslagen). Er is wel een additioneel laadstation nodig is om vanuit een bufferaccu machines op te laden.
- Waterstoftank.

4.3.3 Distributie (energie)

De volgende stap is de energie ook daadwerkelijk bij de machines (het materieel) te krijgen dat het nodig heeft.

Hierbij gaat het dus om:

- Het transport van een energiedrager;
- Een laadpunt op de bouwplaats;
- Een verdeelstation.

Wisselbatterijen moeten vervoerd worden tussen de locatie waar deze worden opgeladen en de locatie van inzet van de machines met een wisselaccu, zodat die beschikbaar is op het moment en de plaats waarop de machine gebruikt moet worden. Voor de machines met een vaste batterij moet de machine of naar een oplaadpunt worden vervoerd of op eigen kracht naar een oplaadpunt kunnen rijden. De keuze hiervoor hangt – net als bij de vraag hoe een wisselbatterij bij een machine komt of andersom – bijvoorbeeld af van de afstanden tot een laadpunt en de tijd dat het kost om daar te komen.

Als de afstand en tijd groter worden dan kan een transportsysteem om de wisselbatterijen te verplaatsten ervoor zorgen dat het materieel in praktijk van de ZE bouwplaats geladen kan worden / geladen accu's kan krijgen (buiten de tijden dat die ingepland staat voor werkzaamheden met dit materieel).

Een laadplein valt onder de categorie 'laad- en of tankpunt'. Dit kan op / binnen de bouwplaats zelf liggen of buiten de bouwplaats (maar binnen een redelijke afstand, zie vorige punt). (zie ook het voorbeeld dat in Kronenburg, 2024 wordt besproken). Als er laadpunten gebruikt worden voor het laden van materieel (al dan niet tijdelijk, als de vraag bijvoorbeeld tijdelijk hoog is) of de bouwactiviteiten dichtbij beschikbare (publieke) laadinfrastructuur plaatsvinden, wordt dit binnen het case ontwerp meegenomen, ook al is het misschien fysiek buiten de bouwplaats.

Een verdeelstation kan onderdeel uitmaken van de distributie van energie op de bouwplaats. In een verdeelstation wordt elektriciteit omgezet naar een lagere waarde dus bijvoorbeeld van hoogspanning naar middenspanning.

4.3.4 Gebruik

Qua gebruik onderscheiden we in lijn met ENI (2022) machines met wisselaccu, machines met een vaste accu, machines aangedreven op waterstof, en ook nog conventionele machines.

Het aantal verschillende machines op een bouwplaats is enorm, voor nu starten we met de volgende indeling:

asfalt afwerkinstallaties, asfaltfreesmachines, autolaadkranen, betonmixers, bulldozers, dumpers, emulsiespuitwagens, bouw generatoren, gietasfaltketels, graaf-laadcombinaties, graafmachines op banden, graafmachines op banden mini, graafmachines op rupsen, graafmachines op rupsen mini, graders, heiblokken/palenrammers, heimachines/funderingsmachines, hoogwerkers, hydrauliek powerpacks, laadschoppen op banden, laadschoppen op rupsen, landbouwtrekkers, lasaggregaten, lichtmasten, mobiele boorinstallaties, mobiele compressoren, mobiele kranen, mobiele pompen, mobiele zeef- en scheidingsmachines, overslagmachines, rupskranen, ruw terrein heftrucks, schrankladers, torenkranen (mobiel), trilplaten/stampers, vorkheftrucks, walsen, overig stationair, en overig mobiel.

Mocht dit onvoldoende zijn vullen we het gedurende de casebeschrijvingen aan. Voor het gebruik kijken we ook naar de *vermogenstypes* van deze machines, in de volgende klassen:

<19 kW, 19 ≤ kW < 37, 37 ≤ kW < 56, 56 ≤ kW < 75, 75 ≤ kW < 130, 130 ≤ kW < 300, 300 ≤ kW < 560, 560 ≤ kW < 1000, en > 1000 kW

en naar de volgende *emissienormen* (indien van toepassing):

STAGE I, STAGE II, STAGE IIIa, STAGE IIIb, STAGE IV, STAGE V, ZE.

Binnen gebruik wordt een overzicht gegeven van de daadwerkelijk ingezette ZE-bouwmachines en de overige traditionele bouwmachines (of – als dat niet beschikbaar is – welke traditionele machines gebruikt zijn omdat er geen ZE-alternatief beschikbaar was).

4.3.5 Transport (mensen, middelen, machines en energiedragers) van en naar bouwplaats

Naast het verbruik van de machines op de bouwplaats, hebben ook de transportmiddelen die mensen, materieel en materiaal naar en van de bouwplaats vervoeren energie nodig. Dit transport veroorzaakt ook emissies, al is het overgrote deel van de uitstoot buiten de bouwplaats. Qua voertuigen en verschillende stromen volgen we de indeling zoals weergegeven in TSL (2020), zie Tabel 2. De gebruikte voertuigen verdelen we onder in (van licht naar zwaar):

personenauto, bestelauto, vrachtauto licht, vrachtauto middelzwaar, vrachtauto zwaar, trekker-oplegger en utiliteitsvoertuig.

Daarnaast wordt aangegeven wat de Euronorm (of ZE) is om de emissies van de gebruikte voertuigen inzichtelijk te krijgen. In de cases wordt ook gekeken of deze voertuigen een energiebehoefte hebben op de bouwplaats (dus is er een laadbehoefte, en zo ja: welke). (Voor de bouwplaatsen die om varende materieel of vervoer vragen geldt vanzelfsprekend een andere categorie).

Naast transport van mensen, middelen en machines is het transport van energiedragers ook onderdeel van het transport van en naar de werkplaats.

4.3.6 Energiemanagement en -sturing voor ZE bouw

Als laatste blok in het case ontwerp is ‘energiemanagement en -sturing voor ZE bouw’ toegevoegd. Dit blok geeft weer op welke wijze er anders wordt gepland en gestuurd op enerzijds bouwactiviteiten en energieverbruik tijdens bouwactiviteiten en anderzijds het opladen van het ZE materieel, omdat dit ZE is of omdat er door slim energiemanagement meer gedaan kan worden op een bepaalde aansluiting. Met andere woorden, dit blok beschrijft allereerst of er anders gepland wordt omdat er ZE materieel gebruikt wordt. Het kan ook zo zijn dat er eigenlijk niets echt anders is op de bouwplaats, behalve dat er een machine zonder emissies is. Vervolgens wordt als tweede beschreven in hoeverre het energieverbruik zo gepland wordt dat het binnen de bestaande aansluiting kan worden gedaan. Een slim energiemanagementsysteem, kan bijdragen aan het goed plannen van laadprocessen over machines heen, rekening houdend met wanneer wat nodig is en hoever het geladen zou moeten zijn en het beschikbare vermogen aan elektriciteit. Kortom, dit is medebepalend voor de eerdere genoemde energievraag en energiebehoefte.

Voor dit blok hebben we nog geen classificatie gevonden, dit zal vooral beschrijvend zijn.

4.4 Case uitkomsten

Het laatste blok zijn de case uitkomsten. Hierin beschrijven we de uitkomsten vanuit de verschillende cases. De elementen hier zijn vooral beschrijvend, en als het goed is zijn die (deels) te linken aan elementen in het case ontwerp.

Mate van ZE

Het eerste element is de ‘mate van ZE’, hierin wordt beschreven wat er wel en niet ZE was op en rond de bouwplaats en waarom. Waar mogelijk refereren we naar de meer kwantitatieve data van de monitoring van de cases, zoals: totaal energieverbruik, nuttig bestede werkuren versus laadtijd en/of inactieve werkuren van machines, etc.

Voor de interne TRANSENERGY cases wordt per case bepaald wat er gemonitord kan worden, voor de externe cases refereren we naar monitoringsdata indien deze beschikbaar is.

Succesfactoren (gebruik) ZE *lessen*

In dit element worden de positieve lessen, de zaken die het mogelijk hebben gemaakt dat er ZE gewerkt wordt, in de case beschreven. Hierbij wordt gekeken naar wat (positief) heeft bijgedragen aan het in de praktijk realiseren van ZE, denk aan de gerealiseerde inzet van ZE materieel op de bouwplaats en ZE vervoer van en naar de bouwplaats en de (positieve) effecten op het energieverbruik en de gerealiseerde energievoorzieningen, op de processen op de bouwplaats, op de realisatie van het bouwtraject, en op de kosten van en in het bouwtraject en op de emissies van en rond de bouwplaats?

Barrières (gebruik) ZE *lessen*

In dit element worden de negatieve lessen, de zaken die het onmogelijk of moeizaam hebben gemaakt dat er ZE gewerkt wordt, in de case beschreven. Hierbij wordt gekeken naar wat (negatief) heeft bijgedragen aan het in de praktijk realiseren van ZE, denk aan de gerealiseerde inzet van ZE materieel op de bouwplaats en ZE vervoer van en naar de bouwplaats en de (negatieve of belemmerende) effecten op het energieverbruik en de gerealiseerde energievoorzieningen, op de processen op de bouwplaats, op de realisatie van het bouwtraject, en op de kosten van en in het bouwtraject en op de emissies van en rond de bouwplaats?

Manier van rapporteren en meten

In dit element wordt beschreven hoe de ZE resultaten zijn gerapporteerd en gemonitord in de betreffende case.

5 Case study ontwerp

5.1 Onderscheid TRANSENERGY cases (WP2) en externe cases (WP3)

Zoals beschreven in paragraaf 2.1 (zie ook Figuur 2.2) volgt de TRANSENERGY onderzoeksopzet (WP1 tot en met 4) een case study aanpak zoals beschreven door Yin (2003, p46 en verder). WP1 geeft invulling aan de ‘define & design’-fase. Deze deliverable gaat specifiek in op werkpakket 1, maar is ook input voor WP2 en WP3 die ingaan op de ‘prepare, collect, analyse’-fase, waarin de analyse op individueel case-niveau plaatsvindt en uiteindelijk op de cross-case analyse in WP4. Het conceptueel model zoals beschreven in hoofdstuk 4 wordt gebruikt voor zowel TRANSENERGY cases in WP2 als voor de externe cases in WP3.

Het case study protocol, dat centraal staat in activiteit 1.2 en dat we in dit hoofdstuk verder beschrijven, maakt onderscheid tussen de WP2 en WP3 cases. Voor de cases in WP2 werken we samen met partners in TRANSENERGY om data te verzamelen gedurende een langere looptijd, het gaat hier om in-depth cases. Voor de externe cases in WP3 maken we gebruik van reeds verzamelde data en/of een beperkt aantal interviews per case om zo voor elke case inzicht te krijgen in de kenmerken, het ontwerp en de uitkomsten (zie 1, 2 en 3 in het conceptueel model). We gaan voor de externe cases geen nieuwe data op de bouwplaats verzamelen, zoals monitoring van het verbruik van machines. Voor de WP3 cases maken we – naast interviews – dus vooral gebruik van secondary data^g, terwijl we voor de WP2 cases (TRANSENERGY cases) ook primary data verzamelen. Een ander verschil is dat de WP2 cases al vaststaan, terwijl de selectie van WP3 cases nog plaats moet vinden. Case selectiecriteria gelden dus wel voor externe cases, maar gaan niet op voor de TRANSENERGY cases die tijdens het voorstel al geselecteerd zijn.

Dit onderscheid nemen we mee in het case study protocol. In dit onderzoek volgen we het theorievormend case study ontwerp waarin we willen verkennen welke voldoende of noodzakelijke condities bepalend zijn voor een ZE bouwplaats en of er probabilistische of deterministische relaties zijn tussen de concepten onder kenmerken, ontwerp en de uitkomsten binnen de cases (hierin volgen we Dul en Hak, 2008 hoofdstuk 9 ‘the theory-building case study’).

5.2 Case study protocol

Het case study protocol geeft volgens Rashid et al. (2019) de onderzoekers richtlijnen voor het verzamelen van data en de analyse van de cases. Het protocol van de casestudy moet zaken als de onderzoeksvraag, de onderzoeksmethode, de manier waarop toestemming voor gebruik en publicatie van cases wordt geregeld, ethische overwegingen, en

^g Primaire data zijn data die binnen TRANSENERGY door de onderzoekers (in samenwerking met de partners) zelf worden vergaard voor het TRANSENERGY-onderzoek middels observaties en monitoring. Deze onbewerkte brongegevens zijn dus niet eerder door een andere onderzoeker verzameld, vastgelegd en eventueel gepubliceerd. Secondary data, ofwel secundaire data zijn daarentegen wel eerder verzameld (en eventueel geanalyseerd) door anderen – het gaat hier om de externe cases.

beoordelingscriteria bevatten (Rashid et al. (2019)). Voss et al. (2015) geeft aan dat een goed protocol essentieel is voor case study onderzoek. Een case study protocol bevat ook procedures en de algemene regels die moeten worden gebruikt bij het gebruik van het (de) instrument(en), en geeft aan bij wie of waar verschillende soorten informatie moeten worden gezocht. Een beginpunt is de definitie van de bestudeerde verschijnselen en de eenheid van analyse. Het schetst de onderwerpen die tijdens een interview aan bod moeten komen, stelt de vragen die moeten worden gesteld en geeft aan welke specifieke gegevens nodig zijn. Het protocol dient als leidraad voor het interview en als checklist om er zeker van te zijn dat alle onderwerpen aan bod zijn gekomen.

Verschiedende elementen van het TRANSENERGY case study protocol zijn al beschreven (in de voorgaande hoofdstukken en / of het bij Dinalog ingediende voorstel). Hieronder wordt op basis hiervan het protocol samengevat:

5.2.1 Onderzoeksvraag

De hoofdonderzoeksvraag is:

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

Deze hoofdvraag valt uiteen in de volgende deelvragen, op basis van het conceptueel model zoals beschreven in hoofdstuk 3. (Deze deelvragen zijn gebaseerd op de vragen zoals die in het voorstel stonden, maar hier en daar aangepast op basis van het conceptueel model).

1. Energieaanbod: welke energievoorzieningen worden gerealiseerd voor welke typen bouwplaatsen in de praktijk?
 - a. Welke oplossingen met betrekking tot energievoorzieningen worden er gerealiseerd bij verschillende typen (gedeeltelijke) ZE bouwplaatsen en welke praktische consequenties zijn hier aan verbonden?
 - b. Welke effecten hebben de gerealiseerde energievoorziening op de mogelijke inzet van materieel, op de processen op de bouwplaats, op de realisatie van het bouwtraject, en op de kosten van en in het bouwtraject en op de emissies van en rond de bouwplaats?
 - c. Welke fysieke (rand)voorwaarden hebben geleid tot welke energievoorziening?
 - d. Welke gerealiseerde oplossingen met betrekking tot energievoorzieningen kunnen onder welke voorwaarden ook worden toegepast op andere type bouwplaatsen?
2. Energievraag: welke inzet van ZE materieel en ZE vervoer kan onder de energievoorzieningen worden gerealiseerd voor welke typen bouwplaatsen in de praktijk?
 - a. Welke inzet van ZE materieel op de bouwplaats en ZE vervoer van en naar de bouwplaats kan worden gerealiseerd voor verschillende typen bouwplaatsen en welke praktische consequenties zijn hier aan verbonden?
 - b. Welke effecten hebben de gerealiseerde inzet van ZE materieel op de bouwplaats en ZE vervoer van en naar de bouwplaats op het energieverbruik en de gerealiseerde energievoorzieningen, op de processen op de bouwplaats, op de realisatie van het bouwtraject, en op de kosten van en in het bouwtraject en op de emissies van en rond de bouwplaats?
 - c. Welke (rand)voorwaarden hebben geleid tot welke inzet van ZE materieel en ZE vervoer?
 - d. Welke gerealiseerde oplossingen met betrekking tot de inzet van ZE materieel op de bouwplaats en ZE vervoer van en naar de bouwplaats kunnen onder welke voorwaarden ook worden toegepast op andere type bouwplaatsen?

- e. Welke veranderingen in energievraag zijn er in de praktijk bij inzet van ZE materieel op de bouwplaats en ZE vervoer van en naar de bouwplaats ten opzichte van inzet van conventioneel materieel en conventionele voertuigen?
- f. Welke logistieke concepten worden er in de praktijk toegepast om de energievoorziening op de bouwplaats te verzekeren bij alternatieve vormen van energie (zoals mobiele accucontainers of waterstof-vulpunten, verwisselbare accu's, waterstofaggregaten voor opladen van elektrisch materieel) en andere off-grid- of niet-netaansluitingsoplossingen?
- 3. De ZE bouwplaats: welke mogelijkheden zijn er voor het realiseren van een ZE bouwplaats in de praktijk voor welke typen bouwplaats?
 - a. Welke factoren bepalen de opschaalbaarheid van de concepten op welke type bouwplaatsen?
 - b. Op welke wijze zouden gerealiseerde oplossingen met betrekking tot energievoorziening en de inzet van ZE materieel en ZE vervoer kunnen worden verbeterd?
 - c. Voor welk type bouwplaats (en welke bouwactiviteiten) zijn welke (gerealiseerde) oplossingen met betrekking tot energievoorziening en de inzet van ZE materieel en ZE vervoer mogelijk met welke gevolgen (denk aan kosten, emissies, procesverandering, realisatie en doorlooptijd van bouwtrajecten)?

5.2.2 Eenheid van analyse⁹

Om deze onderzoeksvragen te beantwoorden maken we in TRANSENERGY gebruik van een (meervoudige) case study onderzoeksstrategie. Binnen deze meervoudige case study is de eenheid van analyse de (zero-emissie) bouwplaats. (Let wel, mocht er bepaalde laadinfrastructuur gebruikt worden om materieel te laden die beschikbaar is, maar buiten de bouwplaats staat, dan valt dit nog steeds binnen de eenheid van analyse, omdat het gaat om het laden van materieel dat activiteiten uitvoert op de bouwplaats, zie ook '4.3.3 distributie'). De eenheid van analyse – de (zero-emissie) bouwplaats – is dus anders dan die in bepaalde monitoringsstudies, waar de eenheid van analyse bouw materieel is dat wordt gemonitord. In deze studie kijken we naar de totale configuratie van de bouwplaats, en niet zo zeer naar de inzet van één of meerdere machines.

5.2.3 Definitie van bestudeerde verschijnselen

De bestudeerde verschijnselen worden gedefinieerd vanuit het conceptueel model; de (zero-emissie) bouwplaats is de eenheid van analyse, dus de case. Dit betekent dat de volgende zaken worden bestudeerd: 1) de kenmerken van de bouwplaats (zie 1. Case kenmerken in Figuur 4.1), 2) het ontwerp van de energievoorziening op de bouwplaats en het verbruik van energie gekoppeld aan de inzet van bouw machines op (en bouwvoertuigen van en naar) de bouwplaats (zie 2. Case ontwerp in Figuur 4.1) en 3) de lessen en ervaringen met de inzet van ZE materieel en middelen (zie 3. Case uitkomsten in Figuur 4.1). De sub paragrafen in hoofdstuk 4 beschrijven hoe we de verschillende elementen in deze drie blokken definiëren.

Zoals eerder beschreven werden er verschillende termen voor de factoren door elkaar gebruikt, en zijn deze niet verder gedefinieerd. Binnen het conceptueel model is wel gedefinieerd wat er onder de verschillende blokken valt. Onze aanpak laat echter ruimte voor voortschrijdend inzicht, dus als vanuit de cases (de interviews en beschikbare data) blijkt dat er bepaalde elementen ontbreken zullen die worden toegevoegd aan de blokken

⁹ De eenheid van analyse (unit of analysis) is gedefinieerd als “over wie of wat uitspraken worden gemaakt” wordt binnen de case study.

en voor alle cases worden ingevuld. Met name het blok ‘case uitkomsten’ is nog het minst gedefinieerd; mede door het feit er nog maar zeer beperkt ervaring is in de praktijk met volledig ZE bouwplaatsen, waardoor gedeeltelijk ZE vaak ook als succesvol wordt gezien. Dit blok zullen we vooral op basis van open interview-vragen gaan onderzoeken. Op basis hiervan zullen we de mate van ZE, succesfactoren en barrières verder definiëren.

5.2.4 Onderwerpen voor interviews en databehoeftes

De cases – en dan gaat het vooral om de externe cases (WP3, zie Figuur 2.2) – worden geanalyseerd op basis van:

- *case-documentatie*: indien beschikbaar. Omdat het deels om innovatieprojecten gaat rond de inzet van relatief nieuwe en onbekende technologie, namelijk ZE machines en voertuigen en deze vaak (deels) met subsidie zijn aangeschaft, moet er ook gerapporteerd worden. Hierdoor is er vaak documentatie over de inzet van de ZE middelen. De documentatie kan openbaar zijn of niet openbaar, via subsidieverstrekkers wordt nagegaan wat te delen is en wie contactpersonen zijn voor deze cases. De documentatie zou moeten gaan over minimaal één van de drie blokken uit het conceptueel model: kenmerken, ontwerp en uitkomsten. Voor een case is data over alle drie de blokken nodig. Als dit vanuit de documentatie niet beschikbaar is, is aanvullende informatie vanuit een interview (of meerdere interviews) noodzakelijk.
- *interviews*: voor cases waar voor ons geen documentatie beschikbaar is, de documentatie onvolledig is (dus niet alle drie de blokken beschrijft), plannen we interviews. De interviews zullen een vaste structuur volgen, in lijn met het conceptueel model. De onderwerpen die worden behandeld zijn de elementen uit de drie blokken, leidend tot de volgende interview outline:
 - 1) *kenmerken*:
 - wat is het type bouwplaats?
 - in welke tijdsfase werd ZE bouwplaats ontworpen, en zijn hier veranderingen in geweest gedurende het bouwtraject (en waarom)?
 - wat zijn de kenmerken van de bouwplaats, locatie, ramingskosten en bruto vloeroppervlakte?
 - wat was de reden om aan een (gedeeltelijk) ZE bouwplaats te werken, op welke wijze was dit gevraagd vanuit de aanbestedingseisen?
 - 2) *ontwerp*, hoe is het volgende georganiseerd / ingeregeld op de (gedeeltelijke) ZE bouwplaats (waar mogelijk gezamenlijke schets hoe het ontwerp eruit ziet):
 - de opwekking
 - opslag
 - distributie (energie)
 - gebruik (verbruik)
 - transport (mensen, middelen en materiaal) van en naar de bouwplaats
 - energimanagement en -sturing voor ZE
 - 3) *uitkomsten*
 - welk deel van de activiteiten was (is) uiteindelijk ZE, en hoeveel is dat meer / minder dan gepland en wat zijn de redenen voor deze afwijking van het plan?
 - wat heeft -volgens u – bijgedragen aan het gedeeltelijk ZE krijgen van de activiteiten op (en rond) de bouwplaats? (meerdere antwoorden mogelijk, zo veel mogelijk redenen – eventueel ordenen van belangrijkste naar minst belangrijke factor).
 - wat heeft -volgens u – bijgedragen aan het niet ZE krijgen van of wat waren extra zaken die geregeld moesten worden om bepaalde activiteiten ZE te

kunnen uitvoeren op (en rond) de bouwplaats? (meerdere antwoorden mogelijk, zo veel mogelijk redenen – eventueel ordenen van belangrijkste naar minst belangrijke factor).

- Op welke wijze heeft u de ZE machines gemonitord? (En is dat beschikbaar voor ons)?
- Op welke wijze heeft u de lessen en ervaringen rond de ZE bouwplaats vastgelegd? (En is dat beschikbaar voor ons)?
- Is er nog andere documentatie van de ZE bouwplaats?
- Zijn er nog zaken niet besproken die u hier wel over wilt zeggen?

Voor de TRANSENERGY cases (WP2, zie Figuur 2.2) wordt per case een specifiek case plan gemaakt voor de in-depth case study van deze cases (zie 5.3 voor een eerste opzet), in tegenstelling tot de externe cases.

5.2.5 Case selectie (externe cases, WP3)

De selectie van cases – dit geldt voor de externe cases van WP3, aangezien de TRANSENERGY cases in samenwerking met de projectpartners verder worden vormgegeven – is relatief eenvoudig. De case moet aan de volgende eisen voldoen:

- Er moet sprake zijn van een (gedeeltelijke) ZE bouwplaats – dat betekent dat er ZE materieel wordt ingezet op de bouwplaats dat opgeladen moet worden / van energie moet worden voorzien of dat er ZE voertuigen (bij)geladen worden op de bouwplaats vanuit hiervoor beschikbaar gemaakte laadcapaciteit of dat er moet sprake zijn van (mislukte) plannen om ZE materieel in te zetten en / of ZE voertuigen op te laden op de bouwplaats.

Praktische overwegingen zijn bepalend voor het aantal cases dat geselecteerd kan en zal worden: hierbij gaat het vooral om beschikbaarheid, openbaarheid en welwillendheid tegenover het delen van data (documentatie en tijd voor interviews). De doorlooptijd van WP3 en de tijd die beschikbaar is, is ook deels bepalend voor het aantal cases, waarbij het mogelijk is dat een bepaald contactpersoon meerdere cases kan bespreken in een interview (bijvoorbeeld als ZE materieel op verschillende bouwplaatsen is ingezet, maar de opwekking, opslag en distributie van energie anders is georganiseerd).

We verwachten cases te kunnen selecteren uit het SSEB programma (contact via RVO), lopende trajecten in het TNO meet- en monitoringsprogramma (emissies in de bouwsector), lopende DKTI-projecten (zoals de Bouwplaats van Morgen en Funda(ce)ment), andere projecten van consortiumpartijen uit dit voorstel, Rijkswaterstaat, SKOON, ElaadNL, TLN, Bouwend Nederland, Cumela, ENI, Kiemt, via de stuurgroep bouwlogistiek en mobiele werktuigen (vanuit de Topsector Logistiek) en ander lopende projecten als onderdeel van het kennis- en innovatieprogramma SEB (zoals SEB doorontwikkeling emissiereductietoolbox voor bouw (Bouwemissietool) en SEB aanvulling inzicht bouwemissies). Ook afgeronde projecten worden meegenomen, zoals (TNO, 2023, 2022). Het grotere aantal cases in dit werkpakket (WP3) wordt met name gebruikt voor de cross-case analyse. De rapportage voor een externe case is veel beperkter dan die voor de TRANSENERGY WP2 cases.

5.3 Monitoring van data in TRANSENERGY cases (WP2)

Zoals beschreven in de voorgaande delen monitoren we in de TRANSENERGY cases (WP2) meer dan in de externe cases. De resultaten uit de TRANSENERGY cases worden ook gebruikt in de cross-case analyse in WP4, en zullen dus naast de individuele in-depth case analyses

van WP2, op een soortgelijke manier worden beschreven als de externe cases volgens het conceptueel model.

Om een idee te geven van wat er in de TRANSENERGY cases zal worden of al wordt gedaan gaan we hier kort in op de monitoring en dataverzameling in deze cases.

In bijlage 1 hebben we het monitoringsplan vanuit het DKT1 project Funda(ce)ment toegevoegd. Dit kan als hulpmiddel worden gebruikt bij het definitief opstellen van de monitoringsplannen voor de vier in-depth cases in TRANSENERGY WP2.

5.3.1 Case: Harderwijk - Emissieloze bouwplaats “Waterfront Fase 3”

Waterfront fase 3 bevat vooral het aanleggen van bestratingen en het klaarmaken van de omgeving. Er worden 900 woningen gebouwd in het hele gebied. In eerste instantie wordt vooral het ZE materieel en de laadhub gemonitord, maar binnen de case zijn veel andere zaken die de moeite waard zijn om te verdiepen: de logistiek van het laden, de laadhub, inzetbaarheid en kosten, beschikbaarheid van e-materieel, hoe ZE bouwen financieel onder controle te houden/ krijgen is, hoeveel machines kunnen worden opgeladen, hoeveel tegelijk, ook door meerdere projecten tegelijk?

Hoe precies deze lessen worden vastgelegd en antwoorden op verschillende van dit type vragen in deze case worden gevonden, wordt verder in werkpakket 2 bepaald.

5.3.2 Case: SOK verhardingen Amsterdam

De focus van deze case ligt op het proces voor een definitief ontwerp, om te onderzoeken hoe daar de expertise uit de markt gebruikt kan worden om zo beter voor te sorteren op het emissievrij bouwen. Een veel ervaren probleem bij aannemers in Amsterdam is dat zij bij een definitief ontwerp pas te horen krijgen wat de exacte eisen zijn rondom emissievrij bouwen van een bepaald project. Hierdoor kan niet tijdig worden geanticipeerd op eisen (bijv. het op tijd regelen van een tijdelijke netaansluiting), wat leidt tot verminderde mogelijkheden tot emissievrij bouwen. Wanneer aannemers en gemeentelijke opdrachtgevers in een eerder stadium om tafel gaan, kunnen zij (in theorie) beter gebruik maken van de kennis van aannemers.

Concreet is bij Gemeente Amsterdam een vertaling gemaakt van de proceskaart van de NAL (zie Figuur 3.2), waarin staat beschreven hoe dat proces zou moeten werken. Echter, het is nog onduidelijk of dit daadwerkelijk de beste manier is om tot implementatie van ZE bouwen te komen. Binnen TRANSENERGY zijn we voornemens om binnen één project (of een aantal projecten in hetzelfde gebied) te monitoren of deze proceskaart werkt, waar aanscherpingen nodig zijn en veranderingen teweeg worden gebracht door dit vernieuwde proces.

5.3.3 Case: ProRail

Voor ProRail is het plan nog steeds om bij een railproject het energiegebruik en het energieaanbod te monitoren, waarbij mogelijk stroom van ProRail wordt gebruikt. De moeilijkheid is dat er nog geen concreet project is gevonden, waarbij gebruik gemaakt kan (en mag) worden van de stroomvoorziening van ProRail. Op dit moment beperkt de dataverzameling zich dus tot het documenteren van de barrières.

5.3.4 Case: Dijkversterking Tiel-Waardenburg

Deze case loopt al langer, waardoor het ook gemakkelijker is om bepaalde data (via partners) te monitoren; het volgende staat in de plannen:

Fase 1: basisdata project

De eerste stap wordt om het project goed in beeld te brengen, hiervoor worden de onderstaande activiteiten uitgevoerd (inclusief uitvoerende organisatie):

- Ploegam: beschrijving type bouwplaats: locatie, aantal kilometer dijkversterking, projectduur, type ondergrond, bouwfasen, benodigde activiteiten.
- Ploegam/TNO: Specificaties laadplein → via Mekante Diek
- Ploegam/TNO: Specificaties laadhub: waar bevinden laadhubs? Welke accu's? Hoe vaak per locatie ophalen?
- Ploegam/Staad: Specificaties bouwmachines: Type machine (graafmachine, generator, wiellader etc.), motorvermogen, grootte accupakket (kWh), gewicht machine. Grove inschatting van de uren inzet per machine. Beschrijving bouwmachines in het geval van uitvoering met conventionele (diesel aangedreven) machines. → Via Mekante Diek
- Ploegam/Staad: beschrijving transport van en naar de bouwplaats: Type voertuig (bestelwagen, vrachtwagen), omschrijving (bijv. kipper), emissieklasse, maximaal gewicht, beschrijving doel van de rit. Grove inschatting van het aantal ritten; → Via Mekante Diek
- Ploegam/Staad/TNO: inventarisatie beschikbare databronnen per materieelstuk (fleet management systeem, eigen administratie, tankpas, laadpas, etc.)
- Ploegam/Staad/TNO: bezichtiging laadhub om te bepalen hoe het laden gemonitord kan worden. → Via Mekante Diek

Fase 2: monitoring en data-analyse

Op basis van de bovenstaande gegevens wordt door TNO bepaald hoe de inzetprofielen per materieelstuk en de laadvoorziening het meest efficiënt en nauwkeurig in kaart kan worden gebracht, en bij welke materieelstukken het meeste detailniveau nodig is. Voor de machines en voertuigen wordt door Ploegam/Staad het onderstaande geregistreerd, minimaal op bouwfaseniveau, tot maximaal op dagniveau:

- Draaiuren per machine
- Voertuigkilometers per voertuig (vracht- en bestelwagens)
- Uren stationair draaien op de bouwplaats door wegvoertuigen
- Gemiddeld energie-/brandstofverbruik per materieelstuk (machines en wegvoertuigen)

Op basis van de inzetmonitoring wordt door TNO de energievraag in kaart gebracht per bouwfase. Hierbij wordt onderscheid gemaakt op verschillende niveaus:

1. Energievraag gedurende de dag per machine en in totaal
2. Gemiddelde energievraag per dag per machine en in totaal
3. Impact van transport van en naar bouwplaats op energievraag
4. Vergelijk tussen maximale energieaanbod en daadwerkelijke energievraag

Het energiegebruik wordt ook gemonitord vanuit de laders. Deze dient ter validatie en/of ter aanvulling ten opzichte van de materieelkant. Daarnaast wordt in kaart gebracht hoe de laadhubs logistiek georganiseerd zijn, en of deze geoptimaliseerd kunnen worden.

Deze analyse vormt de basis om de hierboven genoemde onderzoeksvragen te beantwoorden die gerelateerd zijn aan het materieel op de bouwplaats en het transport van en naar de bouwplaats, in relatie tot de energievraag en het energieaanbod.

Door gebruik te maken van zogenaamde emissiefactoren (uitstootcijfers per materieeltype) kan berekend worden wat de totale uitstoot van het project zou zijn geweest wanneer uitgevoerd met conventioneel materieel. De referentie die hierbij wordt gehandhaafd zijn machines met de emissieklassen die momenteel het meest in markt voorkomen, alsook de meest schone dieselmachines die verkrijgbaar zijn (op een reguliere dieselbrandstof). Ook voor het wegtransport wordt gebruikt gemaakt van emissiefactoren.

Fase 3: Werksessies / interviews

De organisatorische en praktische vragen rondom het type bouwplaats en de energievoorziening worden middels werksessies met Ploegam en Staad onderzocht.

De onderstaande onderwerpen voor werksessies / interviews zijn voorzien:

- Kan een methodiek worden opgezet om dit project te vertalen naar andere dijkverzwarringsprojecten?
- Wat waren de vereiste randvoorwaarden voor het organiseren van de ZE bouwplaats, laadplein en laadhubs (zoals vergunningen, doorlooptijd, impact op stroomnetkosten, ervaringen)?
- Welke barrières hebben plaatsgevonden die zijn gerelateerd aan de laadinfrastructuur, het ZE materieel en het vervoer van en naar de bouwplaats?
- Welke oplossingen zijn mogelijk voor de genoemde barrières?

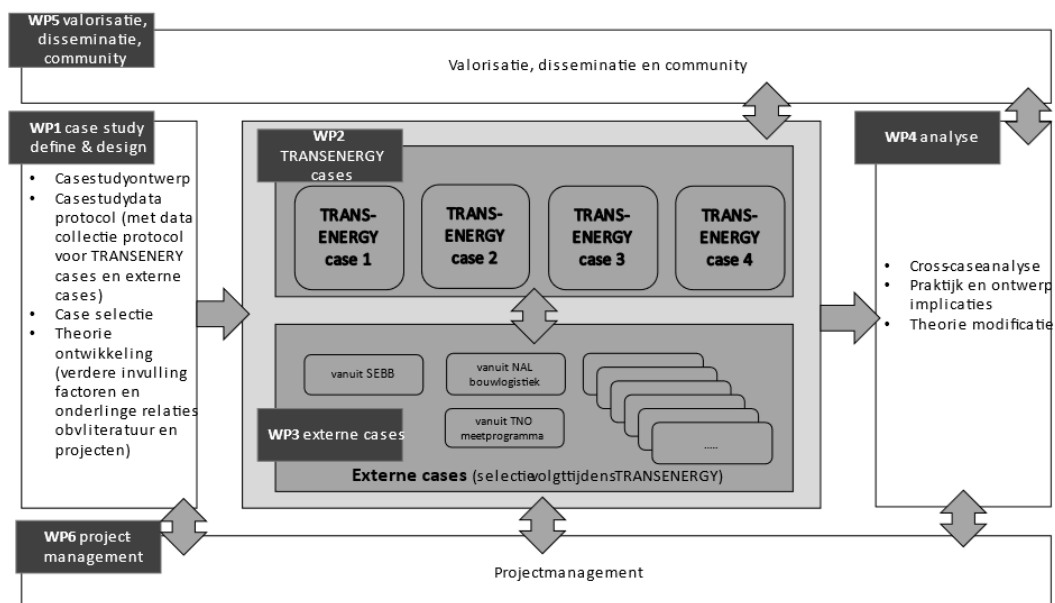
Ten behoeve van de bovenstaande onderwerpen worden door TNO vragenlijsten opgesteld. TNO plant face-to-face interviews in om de vragenlijsten te doorlopen.

Fase 4: Aanbevelingen rondom gekozen energievoorziening en potentieel voor opschaling

De voorgaande drie fasen zijn de basis voor de beantwoording van de overkoepelende onderzoeksvragen. Om te beoordelen of de energievoorziening geoptimaliseerd kan worden, wordt de energie- en vermogensvraag gedurende de dag in detail onderzocht. Hierbij worden mogelijkheden onderzocht om middels een andere laadstrategie en/of inzet van het materieel, het benodigde piekvermogen te reduceren.

6 Vervolg TRANSENERGY

Deze deliverable gaat in op de het definiëren en ontwerpen van de TRANSENERGY case study (zie Figuur 6.1, die eerder als Figuur 2.2 in dit document te vinden was). Na deze deliverable volgen werkpakketten 2 en 3; waarna de cross-case analyse in werkpakket 4 kan plaatsvinden.



Figuur 6.1: Overzicht en samenhang van werkpakketten in TRANSENERGY

Dus wat zijn de volgende stappen in het TRANSENERGY project? Het vervolg loopt door in zowel werkpakket 2 als in Werkpakket 3:

- **Werkpakket 2:** de TRANSENERGY cases, zoals beschreven in paragraaf 5.3, worden met de partners concreet beschreven en voor de verschillende cases zal – wederom samen met de partners – bepaald worden welke primaire data verzameld wordt, op welk niveau, hoe lang en door wie precies.
- **Werkpakket 3:**
 - Allereerst wordt een *longlist* opgesteld met mogelijke interessant externe cases:
 - bij alle partners wordt een uitvraag gedaan naar interessante externe cases.
 - bij verschillende netwerken wordt een uitvraag gedaan naar mogelijke interessante cases (denk aan Topsector Logistiek, RVO (programma SSEB), TNO monitoringsprogramma's en anderen.
 - Op basis van de longlist wordt bepaald welke cases meegenomen gaan worden in het vervolg van WP3, zaken als welke informatie is beschikbaar, willen contactpersonen van een case meewerken etc. spelen hierin een rol.
 - Na de selectie worden de cases beschreven en gecategoriseerd op basis van het conceptueel model (na interviews en data-analyse van de beschikbare case data). Dit vormt dan de basis – samen met de uitkomsten uit WP2 – voor de cross-case analyse in WP4.

Referenties

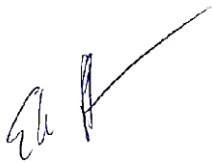
- CBS (2023). De Nederlandse bouwnijverheid in onzekere tijden, 2019-2023. Internet: <https://www.cbs.nl/nl-nl/longread/de-nederlandse-economie/2023/de-nederlandse-bouwnijverheid-in-onzekere-tijden-2019-2023> (laats bezocht 16-7-2024).
- CE Delft (2022a). ZE-bouwplaats Inrichting ZE-bouwplaats en meerkosten. Delft. Publicatienummer: 22.210196.054. In opdracht van: Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
- CE Delft (2022b). Het net slimmer benut! Beleidsmaatregelen voor efficiëntere benutting van de elektriciteitsinfrastructuur. Publicatienummer: 22.210392.032. Internet: <https://ce.nl/publicaties/het-net-slimmer-benut/> (laats bezocht 16-7-2024).
- Dinalog (2022). Topsector Logistiek 2022-2026 – Call for Proposals; Call 2 – 2022: Deel B: Bouwlogistiek en Mobiele Werktuigen. Internet: <https://www.dinalog.nl/wp-content/uploads/2022/12/Topsector-Logistiek-Call-2-2022-Deel-B-Bouwlogistiek-en-Mobiele-Werktuigen-FINAL.pdf> (laatst bezocht op 30-3-2023).
- Dul, J., and T. Hak. (2008). Case study methodology in business research. Routledge.
- EIB (2021). Bedrijfs- economische kencijfers b&u- en gww-bedrijven 2021. Internet: <https://www.eib.nl/publicaties/bedrijfs-economische-kencijfers-bu-en-gww-bedrijven-2021/> (laatst bezocht 16-7-2024).
- Emissieregistratie (2023). Mobiele werktuigen in de bouw. Internet: <https://legacy.emissieregistratie.nl/erpubliek/documenten/07%20Ruimtelijke%20verdeling/Factsheets/Mobiele%20werktuigen%20in%20de%20bouw.pdf> (laatst bezocht 16-7-2024).
- ENI (2022). TOOL — TCO en toegevoegde waarde emissieloze bouwmachines. Internet: <https://www.emissieloosnetwerkinfra.nl/publicaties/34/tool---energievoorziening-voor-de-emissieloze-bouwplaats> (laatst bezocht op 18-7-2024).
- IenW (2022). Zero-emissie bouwvoertuigen: resultaten veelbelovend! In: Specials IenW Innovaties voor duurzaam verkeer en vervoer, Internet: <https://magazines.rijksoverheid.nl/ienw/ienw-specials/2022/15/4.-zero-emissie-bouw-met-projecten> (laatst bezocht op 18-7-2024)
- Kronenberg, O. (2024). Er kan zo veel meer met wat er al aan stroomvoorziening is, Binnenlands bestuur 4-6-2024 (via <https://www.opwegnaarseb.nl/kennisbank/publicaties/114/er-kan-zo-veel-meer-met-wat-er-al-aan-stroomvoorziening-is>, laatst bezocht op 16-7-2024)
- Merosch en CE Delft (2024). Oplossingen voor netcongestie bij bedrijven - Praktijkvoorbeelden met toekomstig potentieel en kosten per oplossing. Rapport in opdracht van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat.
- NAL (2023a). NAL lanceert nieuwe, praktische vermogenstool. Internet: <https://www.agendalaadinfrastructuur.nl/werkgroepen/wg+logistiek/nieuws+werkgroep+logistiek/2414569.aspx> (laatst bezocht op 16-7-2024)

- NAL (2023b). Tool vermogensvraag bouwtraject, XLS-tool v1.3 Internet: <https://www.agendalaadinfrastructuur.nl/PageByID.aspx?sectionID=247358> (laatst bezocht op 16-7-2024)
- NAL (2024). Procesplaat 'Realisatie netaansluiting op de bouwlocatie: een huidig proces en een blik in de toekomst'. Internet: <https://www.agendalaadinfrastructuur.nl/ondersteuning+gemeenten/documenten+en+links/documenten+in+bibliotheek/handlerdownloadfiles.ashx?idnv=2265835> (laatst bezocht op 16-7-2024)
- Natuur&Milieu (2019). Belemmeringen bij de inzet van elektrische mobiele werktuigen. Internet: <https://natuurenmilieu.nl/app/uploads/Belemmeringen-bij-de-inzet-van-elektrische-mobiele-werktuigen.pdf> (laatst bezocht op 16-7-2024).
- NKL (2023a). Handreiking veilig gebruik van openbare laadpalen voor de bouw. Internet: https://nkl.nl/wp-content/uploads/2023/05/Handreiking-veilig-gebruik-van-openbare-laadpalen-voor-de-bouw_DEF.pdf (laatst bezocht op 16-7-2024).
- NKL (2023b). Eisen voor veilig gebruik van laadpalen bij de bouw. Internet: https://nkl.nl/wp-content/uploads/2023/05/Eisen-voor-veilig-gebruik-van-laadpalen-bij-de-bouw_DEF.pdf (laatst bezocht op 16-7-2024).
- PIANOo (2022). Handreiking Aanbesteden Zero emissie bouwmaterieel. Internet: <https://www.piano.nl/sites/default/files/media/documents/2022-06/handreiking-aanbesteden-zero-emissie-bouwmaterieel-januari2022.pdf> (laatst bezocht op 18-7-2024).
- ProRail (2022). ProRail wil emissievrije bouwplaatsen in 2030. Internet: <https://www.prorail.nl/nieuws/prorail-wil-emissievrije-bouwplaatsen-in-2030> (laatst bezocht op 16-7-2024).
- Rashid, Y., Rashid, A., Warraich, M. A., Sabir, S. S., & Waseem, A. (2019). Case study method: A step-by-step guide for business researchers. International journal of qualitative methods, 18, 1609406919862424.
- RVO (2023a). Subsidieregeling Schoon en Emissieloos Bouwmaterieel (SSEB). Internet: <https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/sseb> (laatst bezocht op 16-7-2024).
- RVO (2023b). Subsidieregeling Emissieloze Bedrijfsauto's (SEBA) <https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/seba> (laatst bezocht: 16-7-2024).
- RVO (2023c). Aanschafsubsidie Zero-Emissie Trucks (AanZET <https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/aanzet> (laatst bezocht op 16-7-2024).
- Rijkswaterstaat (RWS) (2022). Aanpak voorbereiding laden op de emissieloze bouwplaats - Transitiepad Weg-, Dijk- en Spoormaterieel. Internet: https://www.duurzameinfra.nl/Portals/0/adam/Content/7yGnMIRw60Gb5iWvJ1ZANA/Text/Factsheet%20WDSM_extern.pdf (laatst bezocht 18-7-2024).
- Rijkswaterstaat (RWS) (2021). De emissieloze bouwplaats: 'Toon lef en zorg dat je meedoet!' Internet: <https://www.magazinesrijkswaterstaat.nl/zakelijkeninnovatie/2021/01/emissieloze-bouwplaats> (laatst bezocht op 16-7-2024).
- SEB (2023). Kennis- en innovatieprogramma schoon en emissieloos bouwen. Internet: <https://www.opwegnaarseb.nl/nieuws/12/kennis-en-innovatieprogramma-schoon-en-emissieloos-bouwen> (laatst bezocht op 16-7-2024).

- TNO (2024). Slimme bouwlogistieke concepten in de praktijk. Internet:
<https://www.tno.nl/nl/duurzaam/duurzaam-verkeer-vervoer/duurzame-logistiek/slimme-bouwlogistieke-concepten/> (laatst bezocht op 18-7-2024).
- TNO (2023). Pilot project Emissie Monitoring en Periodieke Keuring (EMPK) van bouwmachines. TNO 2023 R10553
- TNO (2022). Opties voor laad- en tankinfrastructuur voor mobiele werk-, wegvoer-, spoorvoer- en vaartuigen voor de bouwsector. TNO-2022-NOT-100345396. Notitie in opdracht van Projectteam Programma Schoon en Emissieloos Bouwen.
- TNO (2020). Haalbaarheidsonderzoek naar de elektrificatie van zware mobiele werktuigen – samenvatting onderzoeksrapport. Internet:
https://cdn.opwegnaarseb.nl/media/Rapport_Elektrificatie_Bouwmachines-20200107.pdf (laatst bezocht op: 16-7-2024).
- TSL (2021). OUTLOOK BOUWLOGISTIEK - Scenario's voor reductie van vervoersbewegingen en CO₂-uitstoot in de stad voor (grootschalige) nieuwbouwprojecten in 2030. Internet:
<https://topsectorlogistiek.nl/wp-content/uploads/2021/02/Outlook-Bouwlogistiek.pdf> (laatst bezocht op 16-7-2024)
- Voss, C., Johnson, M., & Godsell, J. (2015, June). Revisiting case research in operations management. In 22nd International Annual EurOMA Conference.
- Voss, C., Tsikriktsis, N., & Frohlich, M. (2002). Case research in operations management. International journal of operations & production management, 22(2), 195-219.

Ondertekening

TNO › Mobility & Built Environment › Den Haag, 17 september 2024



Ellen Hofbauer
Plv. Research Manager



Hans Quak
Auteur

Bijlage A

Monitoringsplan vanuit DKTI project Funda(ce)ment

Voor de TRANSENERGY cases uit WP2 wordt – in gezamenlijkheid met de partners – een case specifiek data collectie plan opgesteld (zoals deels al besproken in paragraaf 5.3). Deels zijn de monitoringsplannen hiervoor al beschreven in 5.3, deels worden die nog verder uitgewerkt. Als basis is in deze bijlage het monitoringsplan zero-emissie (ZE) voertuigen en machines in de bouw (zoals dat is opgesteld in 2022 voor het DKTO project Funda(ce)ment).

Voor de externe cases wordt in TRANSENERGY gebruik gemaakt van secundaire data. Het monitoringsplan in deze bijlage kan helpen bij het in kaart brengen van de relevante (en reeds verzamelde) data in deze cases, vooral rond de prestatie-indicatoren (onderdeel van de ‘case uitkomsten’) en het gebruik (onderdeel van het ‘case ontwerp’). Maar nogmaals – TRANSENERGY is geen monitoringsproject waarin de inzet en gebruik van machines centraal staan, de eenheid van analyse is de (gedeeltelijke) ZE bouwplaats, waar het dus gaat om de i) kenmerken, ii) het ontwerp en iii) de uitkomsten.

Deze bijlage geeft dus vooral richting voor de opzet van de monitoring van de TRANSENERGY cases in WP2 en de belangrijke elementen om op te letten bij de externe cases als het gaat om het gebruik van ZE elektrische voer- en werktuigen in de bouw en de impact op de (logistieke) operatie.

Introductie

Deze bijlage beschrijft het monitoringsplan voor de ZE voertuigen, ZE mobiele werktuigen en laadinfrastructuur die ingezet/gebruikt gaan worden in *de proeftuin van het DKTI-project Funda(ce)ment*. Het doel van monitoren in deze proeftuin is om kennis en inzicht te verkrijgen in de inzet van ZE elektrische voer- en werktuigen in de bouw en de impact op de (logistieke) operatie, de planning en de benodigde energiebehoefte en daarmee een showcase te zijn om het gebied van ZE bouwlogistiek en een ZE bouwplaats en een kickstart te geven aan de opschaling van de inzet van ZE voertuigen en ZE mobiele werktuigen.

Prestatie-indicatoren

In het project worden data verzameld die worden gebruikt om de volgende KPI's te meten:

- **Inzetbaarheid.** De impact van de actieradius en oplaadtijden op de (logistieke) operatie, planning en flexibiliteit van inzet. Afhankelijkheid van de actieradius van bepalende factoren (belading, type rit (snelweg – in binnenstad), buitentemperatuur, gebruik van hulpfuncties (zoals kraaninzet);
- **Milieuaspecten.** Elektriciteitsverbruik in vergelijking met dieselverbruik bij vergelijkbare inzet.

- **Kosten.** Het verschil in TCO van de elektrische variant van het voer-/werktuig (huidig en mogelijke toekomstige situatie) en de dieselveariant. Dit wordt in scenario's uitgewerkt.

Dataverzameling

De ZE voertuigen, ZE machines en de laadsystemen worden gemonitord tijdens hun dagelijkse inzet. Om de eerder benoemde KPI's te analyseren moet op verschillende parameters worden gemeten. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de parameters waarop gemeten gewenst te worden.

Voor een goede monitoring zijn de meeste metingen op 1 Hz-frequentie nodig.

Voertuigen

Voor elk voertuig is de technische informatie van belang. Relevante voertuiggegevens staan weergegeven in onderstaande tabel.

Voertuigspecificaties	
Elektrisch voertuig	Referentie (dieselveertuig, zelfde voertuigtype)
Merk en type	Merk en type
Kenteken	GCW [ton]
Type voertuig (trekker, betonmixer, kraanwagen, etc.)	Vermogen motor [kW]
GCW [ton]	
Capaciteit batterij [kWh]	
Vermogen elektromotor [kW]	

De monitoring vindt plaats op de inzet van het elektrische voertuig in de dagelijkse operatie. De volgende gegevens worden indien beschikbaar verzameld.

Parameter	Eenheid	Bron voor data
Datum en tijd	[d-m-jaar, h:m:s]	Voertuigstelsysteem
Gereden afstand	[km]	Voertuigstelsysteem
Voertuigsnelheid	[km/u]	Voertuigstelsysteem
State of Charge (SOC)	[%]	Voertuigstelsysteem
Vermogen tractiemotor	[kW]	Voertuigstelsysteem
Vermogen E-PTO	[kW]	Voertuigstelsysteem
Batterijvermogen	[kW]	Voertuigstelsysteem
GPS locatie	[l°][l°]	Voertuigstelsysteem
Omgevingstemperatuur	[°C]	Voertuigstelsysteem
Acceleratie	[m/s ²]	Voertuigstelsysteem
Status voertuig	[rijden, laden, regeneratie, gebruik hulpfunctie, stationair]	Voertuigstelsysteem

Energie gebruikt tijdens rijden	[kWh]	Voertuigstelsysteem
Energie gebruikt tijdens stationair draaien	[kWh]	Voertuigstelsysteem
Energie regeneratief	[kWh]	Voertuigstelsysteem
Energie geladen	[kWh]	Voertuigstelsysteem
Spanning	[V]	Voertuigstelsysteem
Stroom	[A]	Voertuigstelsysteem
Belading	[ton]	Registratie vervoerders/chauffeurs
Laad- en loslocaties belading	[l°][l°] / [adres]	Registratie vervoerders/chauffeurs
Registratie ongeplande stilstand		Registratie vervoerders/chauffeurs

Er zijn verschillende bronnen voor de dataverzameling:

- Vanuit de voertuigsystemen (zoals de CAN-bus). De data uit de voertuigsystemen kunnen bijvoorbeeld via een dashboard (zoals VIRICITI) beschikbaar worden gesteld voor analyse. Een alternatief op de data uit de voertuigsystemen halen is om de data vanuit het Fleet Management Systeem (FMS) van vervoerders te halen.
- De overige data, zoals de belading van het voertuig, het ritprofiel (laden/lossen) en registratie van ongeplande stilstand, moeten bij de vervoerder en chauffeurs worden opgehaald. Dit zal worden gedaan op basis van een Google Forms-formulier dat per voertuig dagelijks (als het voertuig is ingezet) wordt ingevuld door de vervoerder/chauffeur. Indien de data op een geautomatiseerd wijze en/of voor de vervoerder eenvoudiger manier beschikbaar kan worden gesteld is dat ook mogelijk.

Om de TCO's te berekenen zijn zowel gegevens over kosten nodig van de elektrische voertuigen als de referentievoertuigen. De tabel hieronder geeft een overzicht van de benodigde gegevens.

Kosten	
Elektrisch voertuig	Referentie (dieselvoertuig, zelfde voertuigtype)
Basis voertuig- en inzetgegevens	
Aanschafkosten [€]	Aanschafkosten [€]
Economische levensduur [jaar]	Economische levensduur [jaar]
Verwacht jaarkilometrage [km]	Verwacht jaarkilometrage [km]
Productieve uren per jaar [uur]	Productieve uren per jaar [uur]
Restwaarde [€]	Restwaarde [€]
Subsidie [€]	
Vaste kosten	
Verzekering [€]	Verzekering [€]
Wegenbelasting [€]	Wegenbelasting [€]
Eurovignet [€]	Eurovignet [€]
Rente [€]	Rente [€]
Voertuigheffing [€]	Voertuigheffing [€]
Overige vaste voertuigkosten [€]	Overige vaste voertuigkosten [€]

Variabele kosten	
Onderhoudskosten [€/jaar of €/km]	Onderhoudskosten [€/jaar of €/km]
Reparatiekosten [€/jaar of €/km]	Reparatiekosten [€/jaar of €/km]
Aantal banden	Aantal banden
Prijs van een band	Prijs van een band
Levensduur band in km	Levensduur band in km
Energiekosten thuisladen [€/kWh]	Brandstofkosten [€/L]
Energiekosten opportunity charging [€/kWh]	Gemiddeld dieselverbruik [L/km]
Percentage opportunity charging [%]	
Gemiddeld energiegebruik [kWh/km]	
Chauffeurskosten	
Chauffeurskosten [€/uur]	Chauffeurskosten [€/uur]

Mobiele werktuigen

Voor elk mobiel werktuig is het relevant om de technische gegevens te weten, zoals weergegeven in onderstaande tabel.

Specificaties mobiele werktuig	
Elektrisch mobiele werktuig	Referentie (dieselvariant van zelfde type mobiele werktuig)
Merk en type	Merk en type
Type werktuig (mobiele graafmachine, bulldozer, heimachine, etc.)	Type werktuig (mobiele graafmachine, bulldozer, heimachine, etc.)
Vermogen motor [kW]	Vermogen motor [kW]
Capaciteit batterij [kWh]	Bouwjaar
Bouwjaar	
Kenteken	

De monitoring vindt plaats op de inzet van de mobiele werktuigen in de dagelijkse operatie. De volgende gegevens worden daarin bij voorkeur verzameld. Monitoring vindt zowel plaats op de machine zelf als op ieder accupakket waar de machine gebruik van maakt. Eén machine kan wisselende accupakketten gebruiken, maar elk accupakket wordt altijd voor dezelfde machine gebruikt.

Parameter	Eenheid	Bron voor data
Datum en tijd	[d-m-jaar, h:m:s]	Machinesystemen
Draaiuren	[u]	Machinesystemen
State of Charge (SOC)	[%]	Machinesystemen
Geleverd vermogen	[kW]	Machinesystemen
GPS locatie	[l°][l°]	Machinesystemen
Omgevingstemperatuur	[°C]	Machinesystemen

Status voertuig	[belast, stekker aangesloten, standby]	Machinesystemen
Energie gebruikt motor(en)	[kWh]	Machinesystemen
Energie gebruikt auxiliaries	[kWh]	Machinesystemen
Energie geladen	[kWh]	Machinesystemen
Batterijvermogen	[kW]	Machinesystemen
Batterij temperatuur	[°C]	Accusystemen
Foutcodes		Machinesystemen
Registratie type klus		Registratie gebruiker
Registratie ongeplande stilstand		Registratie gebruiker

Om de TCO's te berekenen zijn zowel gegevens over kosten nodig van de elektrische mobiele werktuigen als de referentiewerktuigen. De tabel hieronder geeft een overzicht van de benodigde gegevens.

Kosten	
Elektrisch mobiele werktuig	Referentie (diesel, zelfde machinetype)
Basis voertuig- en inzetgegevens	
Aanschafkosten [€]	Aanschafkosten [€]
Economische levensduur elektromotor [jaar]	Economische levensduur [jaar]
Economische levensduur batterijpakket [jaar]	Draaiuren [uur/jaar]
Draaiuren [uur/jaar]	Restwaarde [€]
Restwaarde [€]	
Subsidie [€] (of bedrijfswinst in aanschafjaar en wel/geen MKB)	
Vaste kosten	
Verzekering [€]	Verzekering [€]
Overige vaste kosten [€]	Overige vaste kosten [€]
Variabele kosten	
Onderhoudskosten [€/jaar of €/draaiuur]	Onderhoudskosten [€/jaar of €/draaiuur]
Reparatiekosten [€/jaar of €/draaiuur]	Reparatiekosten [€/jaar of €/draaiuur]
Energiekosten [€/kWh]	Brandstofkosten [€/L]
Gemiddeld energiegebruik [kWh/km]	Gemiddeld dieselverbruik [L/draaiuur]
Chauffeurskosten	
Arbeidskosten machinist [€/draaiuur]	Arbeidskosten machinist [€/draaiuur]

Laadsystemen

Parameter	Eenheid
Technische gegevens rendement laadsysteem	
DC stroom	[A]
DC spanning	[V]
AC stroom (RMS)	[A]
AC spanning (RMS)	[V]
Operationele gegevens	
Vermogen laadpaal	[kW]
Laadstatus	[niet in gebruik, laden, verbonden, storing]
Geleverde energie	[kWh]
Voertuig ID verbonden voertuig	
Prijs elektriciteit	[€/kWh]
Kosten	
Aanschafkosten laadapparatuur (incl. installatiekosten)	[€]
Subsidie laadapparatuur	[€]
Laadapparatuur gedeeld met 'x' voertuigen	[#]
Economische levensduur	[jaar]

Mobility & Built Environment

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