

HAALBAARHEIDSSTUDIE:

ZERO EMISSIE TREINEN

met Opportunity Charging

Provincie Groningen

Contactpersoon



NIEK MÜLLER
Senior Projectleider

T +31 (0)6 2784 5722
M +31 (0)6 2784 5722
E niek.muller@arcadis.com

Arcadis Nederland B.V.
Postbus 220
3800 AE Amersfoort
Nederland

Toelichting

Voor u ligt de rapportage van het onderzoek naar Zero Emissie treinen met Opportunity Charging. Ricardo heeft dit onderzoek samen met Arcadis uitgevoerd. Het vervolg van dit rapport is de integrale rapportage van beide partijen.

COLOFON

HAALBAARHEIDSSSTUDIE:
ZERO EMISSIE TREINEN
MET OPPORTUNITY CHARGING

KLANT

Provincie Groningen

AUTEUR

Niek Müller

PROJECTNUMMER

D04021.000685

DATUM

14 september 2018

GECONTROLEERD DOOR



Wouter Wiersema
Lead Engineer

VRIJGEGEVEN DOOR



Niek Müller
Projectleider energietransitie

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 220
3800 AE Amersfoort
Nederland
+31 (0)88 4261261

www.arcadis.com

Haalbaarheidsstudie:

Zero emissie treinen met opportunity charging



Versie	Status	Opmerking	Door
14 sep 2018	Definitief 2.0	Enkele toevoegingen m.b.t. uitleg batterijen en kostenupdate	Ricardo-Arcadis
15 aug 2018	Definitief		Arcadis-Ricardo
17 juli 2018	Concept-Definitief	Ter controle provincies	Arcadis-Ricardo

In opdracht van:

Provincie Fryslân Postbus 20120 8900 HM Leeuwarden	Provincie Groningen Postbus 610 9700 AP Groningen
	
David de Vries Projectleider Duurzaam Openbaar Vervoer	Andre Buikhuizen Beleidsmedewerker openbaar vervoer

Uitgevoerd door:

Arcadis Nederland B.V. Postbus 220 3800 AE Amersfoort Nederland	Ricardo Rail Catharijnesingel 33 3511 GC Utrecht Nederland
	
Wouter Wiersema Lead Engineer, Adviseur spoor 06 2706 0040 wouter.wiersema@arcadis.com	Johan van der Werf Lead Engineer, Senior adviseur energie 06 4569 8649 johan.vanderwerf@ricardo.com Merlijn van Rij Technisch consultant 06 5574 2047 merlijn.vanrij@ricardo.com
Niek Müller Projectleider energietransitie 06 2784 5722 niek.muller@arcadis.com	Martijn Wolf Projectleider, Technisch consultant 06 4569 8648 martijn.wolf@ricardo.com

Samenvatting

De provincies Fryslân en Groningen hebben het doel om in de (nabije) toekomst het spoorvervoer emissievrij uit te voeren. Omdat eerdere onderzoeken aangetoond hebben dat elektrificatie van de noordelijke spoorlijnen een grote investering vergen, zoeken de provincies naar mogelijke alternatieve oplossingen. Hierbij is de volgende onderzoeksvraag gesteld:

- 'Wat is de haalbaarheid van een Zero emissie spoorvervoer middels een batterijtrein met opportunity charging in combinatie met aanvullende energievoorziening via hetzij zo weinig mogelijk partiële bovenleiding, waterstof, of methanol als range-extender?'

De onderzoeks aanpak: De aanpak bestaat uit een analyse van de Zero emissie alternatieven per tracé voor de batterijtrein met opportunity charging met zo nodig een range-extender. Informatie is gehaald uit eerdere onderzoeken en de state-of-art van technieken uit openbare bronnen. Daarnaast is er gewerkt met interviews, deskresearch en vragenlijsten. Hierbij is onder andere informatie opgevraagd bij de leveranciers; Bombardier, Siemens Alstom, Stadler en CAF, bij relaties van de provincies; Arriva en TU Eindhoven.

Uitgangspunten: De dienstregeling van de concessie 2020 - 2035 is als uitgangspunt genomen. Daarnaast is er gekeken naar de doorontwikkeling van de concessie daarna (vanaf 2035). De concessie 2020 - 2035 wordt voor het grotendeel uitgevoerd met Stadler GTW-treinen. Hiernaast worden er vanaf 2020 ook 18 Stadler WINK-treinen ingezet. Deze Wink treinen hebben meer ruimte, kunnen meer gewicht dragen en hebben meer vermogen. Doordat er van de GTW-treinen meer gegevens beschikbaar zijn, is er in deze studie gewerkt met de GTW-trein als uitgangspunt. Er wordt vanuit gegaan dat de conclusies ook gelden voor de WINK-treinen, omdat deze een grotere technische ruimte hebben en meer assen om het gewicht over te verdelen.

Op basis van de onderzoeks aanpak en uitgangspunten zijn verschillende oplossingen bekeken voor een Zero emissie trein in Groningen en Fryslân. Er is een overzicht gegeven van de diverse treintypes en technische mogelijkheden van verschillende batterij- en oplaadtypen. Met de beoogde dienstregeling zijn simulaties gedaan om vast te stellen hoeveel batterijcapaciteit noodzakelijk is. Met deze uitkomsten is gekeken naar de kosten van de verschillende oplossingen. Hieronder de belangrijkste conclusies per thema:

Treintechniek: Batterijtreinen zijn in commerciële dienst in Japan, waterstofftreinen wereldwijd nog niet (wel gepland in 2021).

Batterijtechniek: Voor de benodigde eigenschappen voor de Zero emissie trein komt de Lithium Titanaat Oxide (LTO) batterij in eerste instantie als beste naar voren. Aanvullend is nog een analyse gemaakt met NCM batterijen gezien de positieve ervaringen bij elektrische bussen en auto's. Ook deze optie is een goede mogelijkheid.

Laadtechnieken: Voor het benodigde vermogen, het korte laden en het verbruik is op stations een laadpunt boven de trein en een pantograaf op de trein de beste oplossing (opportunity charging) in combinatie met 's nachts opladen aan via standaard bovenleiding op opsteltrajecten.

Energiescenario's: Arcadis en Ricardo gebruikten elk hun eigen model. Door het kiezen van dezelfde uitgangspunten en de juistheid van de modellen zijn er consistente uitkomsten gegenereerd en geverifieerd. Door uit te gaan van een worstcase situatie is het mogelijk om onder alle verwachte omstandigheden de dienstregeling met deze treinen te kunnen rijden.

Bij ombouw van een GTW 2/6 moet deze worden uitgerust met een pantograaf en totaal 7,5 ton batterijen, deels geplaatst in de power module en op/onder/in de trein. Afhankelijk van de trajecten is een batterij alleen niet voldoende en dient er een range-extender toegepast te worden.

Range-extendors:

- *Partiële bovenleiding:* In de provincie Fryslân zijn laadstations met 5 MW aan vermogen voldoende, behalve bij Leeuwarden waar ook 6.5 km bovenleiding nodig is. In Groningen moet er naast de laadstations ook 4 km bovenleiding worden geplaatst richting Groningen

Europapark. Daarnaast dient er bovenleiding gerealiseerd te worden op de rangeerterreinen in Groningen en Leeuwarden om 's nachts te kunnen laden.

- **Waterstof:** Door toepassing van waterstof is er geen partiële bovenleiding nodig. Ook kan het eventueel bijladen van de bufferbatterijen plaatsvinden via lichtere laadpalen van 600 kW.
- **Methanol:** De railvoertuigindustrie lijkt op dit moment niet te kiezen voor methanol als vervanging voor diesel. Op dit moment zijn er daarom onvoldoende aanknopingspunten om dit als een serieus alternatief te beschouwen voor een Zero emissietrein.

Beantwoording onderzoeksvraag: Het antwoord op de onderzoeksvraag is dat het mogelijk is om met Zero emissie treinen de beoogde dienstregeling te rijden. De Zero emissie trein zal een trein moeten zijn die is voorzien van voldoende batterijcapaciteit aangevuld met partiële bovenleiding of brandstofcellen op waterstof. De exacte capaciteit van de batterijen hangt af van de keuzes die gemaakt worden voor de hoeveelheid bovenleiding of waterstof in de trein. Dit dient uitgewerkt te worden in een detail ontwerp. Methanol is afgefallen als optie, omdat er tot nu toe in de railsector weinig tot geen ontwikkelingen zijn op dit gebied.

De kosten op basis van het globale ontwerp zijn voor beide varianten van treinmaterieel en bijbehorende infrastructuur hieronder vergeleken.

	Batterijtrein ombouw +bovenleiding [miljoen]	Waterstof met OC en ombouw [miljoen]	Waterstof met OC en nieuw [miljoen]
Investering materieel	€ 57	€ 115	€ 325
Investering infrastructuur (oplaadstation en bovenleiding)	€ 47	€ 20	€ 20
Investering Energie	€ 27,5	€ 131	€ 131
Onderhoud (15 jaar)	€ 18,5	€ 56	€ 56
Totaal	€ 150	€ 322	€ 532

Tabel 1: Vergelijking kosten trein varianten met LTO batterijen

Bij toepassing van NCM batterijen zijn de investeringskosten in materieel vergelijkbaar maar kunnen de kosten voor infrastructuur dalen met € 4 miljoen (minder oplaadstations). Verdere detailengineering zal moeten uitwijzen welk batterijtype op aspecten als veiligheid, levensduur, kosten etc. de juiste keuze is voor toepassing in treinen.

Aanbevelingen

Onafhankelijk van welke oplossing wordt gekozen, is het raadzaam om in het detail ontwerp de exacte verhouding tussen de batterijen en lengte partiële bovenleiding, of waterstofcapaciteit te bepalen.

Ten aanzien van de energievoorziening is het raadzaam tijdig samenwerking te zoeken met de netbeheerders om naar de optimale oplossing voor de levering van energie te zoeken.

Bij dit rapport is rekening gehouden met de verschillende tracés. Gezien het uniform houden van veiligheids- en onderhoudsprocedures en het waarborgen van de uitwisselbaarheid van materiaal is het strategisch om te kiezen uit één range-extender en maximaal twee batterij- of twee waterstof-treinconfiguraties. Het is ook mogelijk om bijvoorbeeld een andere keuze te maken in Fryslân dan in Groningen.

Gezien de huidige stand van de techniek en de verwachte technologische ontwikkelingen is het aan te bevelen om in de nieuwe concessie, vanaf 2035, volledig over te gaan naar Zero emissie. Tot dat moment is er gelegenheid om pilots te draaien voor detail engineering van het ontwerp en verdere risico's te beperken. De aankomende periode kan dan worden gebruikt voor het maken van een keuze, het aanvragen van vergunningen, het investeren in infrastructuur en het oppakken van de ontwikkeling met huidige en toekomstige belanghebbenden.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding	7
1.1	Onderzoeksvraag	7
1.2	Disclaimer	7
1.3	Leeswijzer	8
2	Randvoorwaarden	9
3	Status Zero emissie techniek	12
3.1	Batterijtechniek.....	12
3.2	Zero emissie Treinen	17
3.3	Batterijbussen.....	26
4	Analyse naar ombouw bestaande trein.....	31
4.1	Technische haalbaarheid	31
4.2	Mogelijkheden ombouw per 2025	33
4.3	Mogelijkheden ombouw 2035.....	33
5	Bepaling van het energiegebruik	34
5.1	Analysepakketten	34
5.2	Arcadis Xandra simulatie	34
5.3	Ricardo energieberekening	35
5.4	Energievraag per tracé.....	35
6	Haalbaarheid energiescenario's	39
6.1	Uitgangspunten energiescenario's.....	39
6.2	Optimalisatie	44
6.3	Waterstof	44
7	Range-extendors.....	48
7.1	Partiële bovenleiding.....	48
7.2	Waterstof	51
7.3	Methanol.....	58
8	Samenvatting kosten.....	64
8.1	Kosten totaal	64
8.2	Kosten per traject.....	64
9	Conclusies en aanbevelingen	66
9.1	Conclusies	66
9.2	Discussie.....	67
9.3	Aanbevelingen	68
10	Bijlagen.....	71

Afkortingen

Afkortingen

C-rate	Charge rate / laadverhouding
D-rate	Decharge rate / ontlaadverhouding
DOD	Depth of discharge
FLIRT	Flinker Lichter Innovativer Regionaltriebzug
GTW	Gelenktriebwagen
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil (biodiesel)
LTO	Lithium Titanium Oxide
NMC	Nikkel Magnesium Cobalt
SOC	State of charge
SoE	State of energy
WINK	Wandelbarer, Innovativer Nahverkehrs-Kurzzug
ZE	Zero emissie

Chemische formules

CH ₃ OH	Methanol / Methylalcohol
CO ₂	Koolstofdioxide
H ₂	Waterstof
H ₂ O	Water
O ₂	Zuurstof

Eenheden

A	Ampère
Ah	Ampèreuur
(k)Wh	(kilo)Wattuur
Wh/kg	Wattuur per kilogram
Wh/l	Wattuur per liter
(k)m	(kilo)meter
km/u	kilometer per uur
s	seconde
(M)W	(Mega)Watt
V	Volt
Vdc	Volt direct current (gelijkspanning)
(k)VA	(kilo)VoltAmpere
min	minuten
MW	(Mega)Watt

Symbolen

\$	Dollar
€	Euro
°C	Graden Celcius

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Er is al langere tijd bekend dat CO₂ uitstoot bijdraagt aan het broeikaseffect en de daaruit volgende klimaatverandering. Sinds 2015 is de noodzaak voor wereldwijde CO₂ emissie reductie nog verder toegenomen, onder andere door het klimaatverdrag van Parijs. Het doel van u is daarmee meer dan ooit actueel.

De provincies Fryslân en Groningen hebben het doel om in de (nabije) toekomst het spoorvervoer emissievrij uit te voeren. Daarbij is de vraag wat reeds mogelijk is per 2025 en wat de ontwikkelingen zijn richting 2035 wanneer de volgende concessie start.

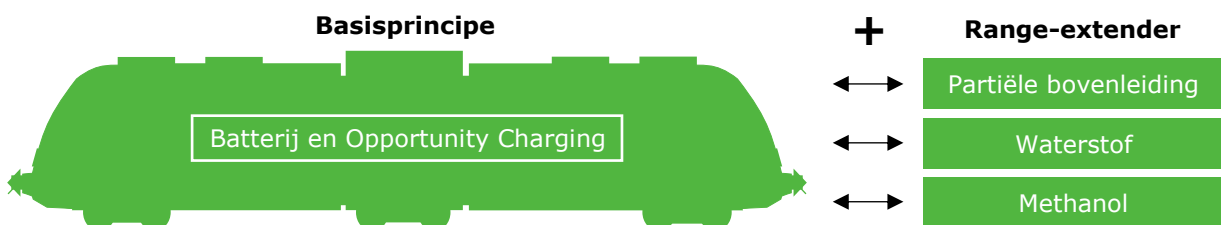
Op dit moment is in de concessie 2020 - 2035 voorzien dat de treinen blijven rijden op diesel waarbij de nieuwe Wink treinen op HVO gaan rijden. Dus voor de variant per 2025 zal daarom worden gekeken naar de ombouw van het beschikbare materieel.

Voorafgaand aan de aanbesteding 2020 - 2035 is reeds onderzoek uitgevoerd naar (partiële) elektrificatie van het netwerk en naar de mogelijkheden van het rijden met waterstoffreinen. In aanvulling hierop hebben de provincies Fryslân en Groningen nu Arcadis en Ricardo gevraagd te onderzoeken wat de mogelijkheden van de batterijtrein met opportunity charging zijn op basis van de state-of-the-art technieken. En indien batterijen met opportunity charging niet voldoende energie levert om de dienstregeling uit te voeren, uit te zoeken; a. hoeveel bovenleiding nog nodig is en op welke locaties of b. het toevoegen van een brandstofcel met waterstof dan als 'range-extender' uitkomst kan bieden. Tevens is gevraagd of trein op methanol een optie zou kunnen zijn.

1.1 Onderzoeksvraag

Voor het onderzoek is de volgende hoofdvraag geformuleerd:

- 'Wat is de haalbaarheid van een Zero emissie spoorvervoer middels een batterijtrein met opportunity charging in combinatie met aanvullende energievoorziening via hetzij zo weinig mogelijk partiele bovenleiding, waterstof, of methanol¹ als range-extender?'



Naast de onderzoeksvraag zijn er randvoorwaarden bepaald, deze zijn opgenomen in Hoofdstuk 2.

1.2 Disclaimer

Bij het gebruik van de informatie in deze rapportage dient de lezer zich het volgende te realiseren:

- De aangegeven technieken zijn voor de treinen nog nieuw. Deze technieken wijken of van de standaarden die op het spoor worden toegepast. En zij wijken ook af van bestaande regelgeving/richtlijnen op het spoor.
- Er zijn op het moment van schrijven nog geen batterijtreinen met opportunity charging, batterijtreinen met waterstof als range-extender danwel treinen die rijden op methanol.
- De benodigde (energie)faciliteiten en voorzieningen zoals in de rapportage beschreven voor de toepassing van dergelijk treinen in de Noordelijke provincies is in capaciteit groot in vergelijking met de huidige wereldwijd bekende in gebruik zijnde faciliteiten en voorzieningen.

¹ Op basis van onderzoek is geconcludeerd dat de railvoertuigindustrie op dit moment niet lijkt te kiezen voor methanol als vervanging voor diesel. Daarom is Methanol niet meegenomen in de analyses van Hoofdstuk 4, 5 en 6. Zie Paragraaf 7.3 voor meer informatie.

- De kosten zijn zo goed mogelijk ingeschat op basis van extrapolatie van de verkregen informatie en bekende kentallen en bedragen. Toekomstige ontwikkelingen, aanvullende informatie en opgedane ervaringen hebben invloed op de daadwerkelijke investerings- en exploitatiekosten.

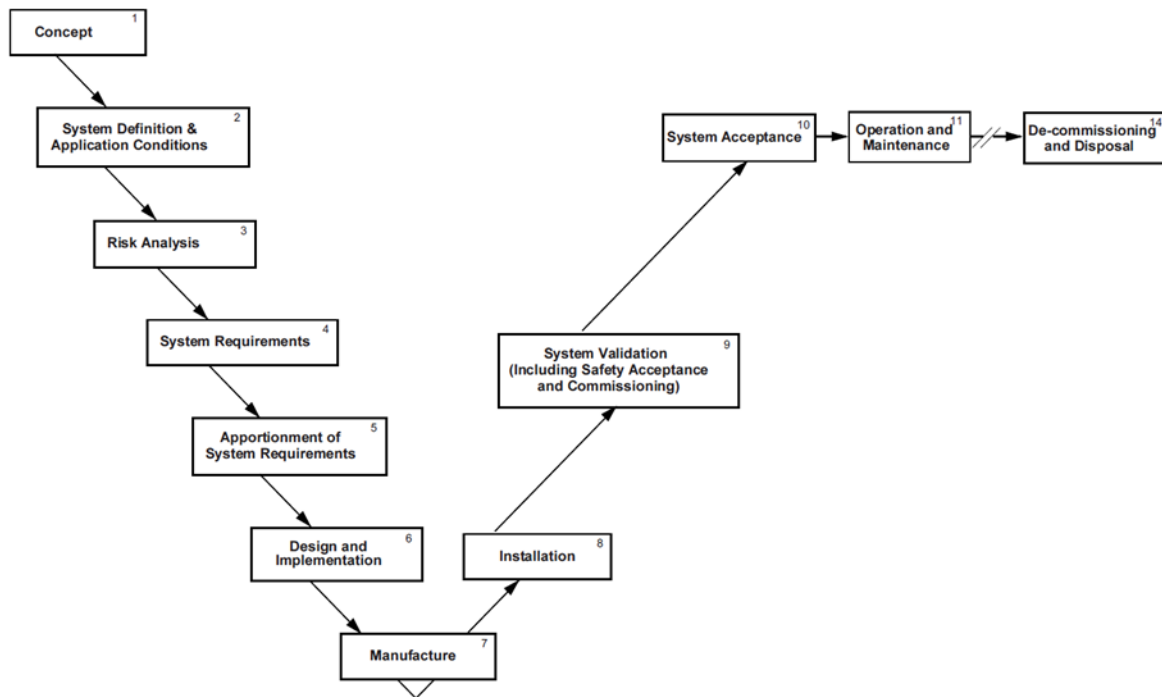
1.3 Leeswijzer

In dit rapport wordt in Hoofdstuk 2 ingegaan op randvoorwaarden behorende bij het onderzoek. Hoofdstuk 3 beschrijft de technische en financiële haalbaarheid van batterijtreinen met opportunity charging aan de hand van de stand van de bestaande batterij-, trein- en batterijbus-technieken. Hoofdstuk 4 analyseert de haalbaarheid van het ombouwen van de bestaande treinstellen op basis van de in Hoofdstuk 3 besproken technieken. Hoofdstuk 5 en 6 behandelen energiescenario's, het energieverbruik op basis van deze energiescenario's en de geschiktheid van het bestaande elektriciteitsnetwerk. Hoofdstuk 7 gaat dieper in op de techniek en de financiële haalbaarheid van de range-extenders: Partiële bovenleiding, Waterstof en Methanol. In Hoofdstuk 8 wordt een samenvatting van de kosten per techniek weergegeven. Hoofdstuk 0 bevat de conclusies waarin de onderzoeksvraag beantwoord wordt en geeft aanbevelingen voor vervolgstappen.

2 Randvoorwaarden

Om tot een eenduidig inzicht te komen over de mogelijkheden van Zero emissie treinen op basis van batterijtechniek worden randvoorwaarden gesteld aan het ontwerp en gebruik. Voor het opstellen van de eisen is in de basis het V-model uit de EN 50126 norm gehanteerd. Deze norm wordt normaliter gehanteerd bij het ontwerpen van een trein.

Het V-model beschrijft de voortdurende wisselwerking plaats tussen specificeren, ontwerpen en afwegen: Een decompositie van globaal niveau tot uiteindelijk een gedetailleerd ontwerp. Daarna zal het model zich richten op het aantonen dat is voldaan aan die eisen.



Figuur 1: The "V" representation (EN 50126-1)

Het doel is het definiëren van (functionele) eisen om een Zero emissie trein een vergelijkbare rol te laten vervullen als de huidige GTW-dieseltrein zoals gebruikt op de noordelijke lijnen. Met deze eisen kunnen berekeningen en analyses worden uitgevoerd die inzichtelijk maken wat wel en niet mogelijk is en wat de kosten van een Zero emissie trein zijn.

Voor dit project is er voor gekozen om de eerste 4 stappen van het V-model te volgen als generaal principe om ontwerp eisen aan het te specificeren. Dat betekent de volgende stappen voor het treinmaterieel:

- Het voertuig concept;
- Voertuig definitie en operationele context;
- Risico's;
- Specificatie van systeem eisen aan het voertuig.

Naast de voertuigen dienen er ook aanpassingen doorgevoerd te worden aan de infrastructuur. Te denken valt aan bovenleiding en bijbehorende onderstations. Deze aanpassingen moeten aan bestaande normen van ProRail voldoen.

In de opvolgende tabel zijn deze fases uitgewerkt waarbij per fase is aangegeven wat de taak is en hoe dat wordt vertaald naar ontwerpeisen voor de Zero emissie treinen.

Belangrijk is dat in een ontwerpproces iteratie nodig is. Dit vindt plaats per fase, maar ook tussen voorgaande fasen. Voor het voorlopige ontwerp is een inventariserend ontwerpproces, geen volledig uitgewerkte specificatie of ontwerp. De randvoorwaarden in onderstaande tabel zijn vooral bedoeld voor het geven van houvast en het komen tot een zo compleet mogelijke inventarisatie voor analyse doeleinde van dit onderzoek. In de vervolgstappen worden deze eisen nader gedetailleerd.

No.	fase	Beschikbaarheid en betrouwbaarheid en veiligheidseisen
1	Concept	Voertuig moet een railvervoersconcept aanbieden overeenkomstig met Dieseltreinen, maar dan CO₂ vrij middels een trein die naast de reguliere bovenleidingsvoeding of een brandstofcel op waterstof een batterij heeft voor de energieopslag benodigd op de stukken zonder bovenleiding. Voor dienstregeling die is beoogd in 2025 en later op de regionale lijnen in Groningen en Fryslân inclusief grensoverschrijdend vervoer richting Duitsland. De batterijen van de trein worden opgeladen bij speciale oplaadpunten en/of de trein gebruikt partiële bovenleiding om de batterijen op te laden en/of gebruikt waterstof om de batterij op te laden en/ of gebruikt methanol² om de batterij op te laden. Het detailniveau zal voldoende zijn om vast te stellen wat de noodzakelijke capaciteit van de batterij van de trein is, waar de oplaadpunten moeten zijn en hoeveel bovenleiding noodzakelijk is en de locatie daarvan. Echter, verdere detailengineering zal uiteindelijk nodig zijn om tot een definitief treinontwerp te komen. Uitgangspunt is dat de benodigde elektriciteit volledig uit hernieuwbare bronnen afkomstig is. Het voertuig moet een vergelijkbaar niveau van betrouwbaarheid en beschikbaarheid ten opzichte van de huidige exploitatie met dieseltreinen. De veiligheidsdoelstellingen (spoorwegveiligheid en arbeidsveiligheid) blijven ongewijzigd (standstill met waar mogelijk en billijk verbetering).
2	Systeem definitie en operationele context	Zero emissie trein met hetzelfde aantal zitplaatsen en (rij)comfort voor de reiziger en acceptabele belasting voor het personeel dat ermee werkt. Deze trein past zonder problemen in de dienstregeling die geldt op 2025 of later. Alle aanpassingen aan de treinen moeten passen binnen de vigerende³ toelatingscriteria. Daar waar een bovenleiding aanwezig is kan de trein rijden zonder benutting van de batterijen en deze opladen. Motorvermogen, aanzetkracht moet worden afgestemd met toename gewicht zodat rijtijden tussen kritische dienstregelpunten overeenkomen met die van GTW Diesel. Actieradius moet voldoende zijn om het voorgenomen logistieke plan inclusief rangeren/schoonmaak/periodieke controles/opstellen mogelijk te maken tussen de batterij-oplaadmomenten.

² Op basis van onderzoek is geconcludeerd dat de railvoertuigindustrie op dit moment niet lijkt te kiezen voor methanol als vervanging voor diesel. Daarom is Methanol niet meegenomen in de analyses van Hoofdstuk 4, 5 en 6. Zie Paragraaf 7.3 voor meer informatie.

³ Er wordt gewerkt met de nu bekende wettelijke normen. Mogelijk dat in 2025 andere normen gelden.

No.	fase	Beschikbaarheid en betrouwbaarheid en veiligheidseisen
3	Risico analyse en Evaluatie	Risico is dat voor een trein die moet gaan rijden zonder extra laadpunten er veel energie mee moet worden genomen en daardoor de massa van de trein te hoog wordt. Bij vaststellen van de minimum batterijcapaciteit wordt uitgegaan van slechte omstandigheden: tegenwind, volle belading en buitentemperatuur -20 °C. De trein kan de normale dienstregeling rijden zonder tijdsverlies door het opladen van de batterijen. Dit kan door een grote batterijcapaciteit, snelle opportunity charging of voldoende bovenleiding op het traject of gebruik waterstof. Het toepassen van batterijen levert extra aandacht op brandveiligheidseisen en vrijkomen toxische stoffen. (Dit is niet in detail beschouwd in deze studie) Bij onderhoud en calamiteiten extra aandacht voor elektrocutiegevaar
4	Systeem specificatie	Rijtijden moeten worden gehaald voor de dienstregeling. Extra gewicht leidt tot langzamere trein wat gecompenseerd moet worden met meer vermogen en/of meer trekkracht. Er is ook voldoende batterijcapaciteit/bovenleiding om de treinbewegingen buiten de reizigersdienst uit te voeren: rangeren, overbrengingsritten, opstellen etc. Extra massa resulteert in de noodzaak van hoger vermogen en aanzetkracht om de rijtijden te halen. Afweging van meer batterijvermogen versus meer bovenleiding moet gemaakt worden om onder andere een toelaatbaar ontwerp te maken. Bij het ontwerp dient rekening gehouden te worden met voldoende tractiemogelijkheid om bij voorzienbare verstoringen (bijvoorbeeld noodremtrekking) voldoende actieradius te houden om een oplaadpunt te bereiken (eventueel met aangepaste snelheid). Klimaat: er dient 50 kWh per bak beschikbaar te zijn voor het klimaatsysteem. De batterijen worden ook opgeladen door te remmen in ieder geval in de bovenleidingsloze secties. Toe te passen bovenleidingsysteem is B1 in combinatie met standaard stroomafnemer voor tractie. Bij opladen van de batterij zal een specifieke interface (contact en stroomafnemer) worden toegepast. Verwachte weersextremen (regenval, ijzel, temperatuur (-20 °C tot +35 °C) zorgen niet voor een vermindering van beschikbaarheid of prestaties. Zero emissie trein moet koppelbaar zijn met andere treinen om bij stranding snel weer de baan vrij te kunnen maken en reizigers hun weg te laten vervolgen. Batterijpakketten moeten voldoen aan vigerende eisen voor brandveiligheid. Onderhoud aan voertuigen moet conform de vigerende normen voor werken aan elektrotechnische installatie worden uitgevoerd.

Tabel 2: Randvoorwaarden

Naast bovenstaande generieke eisen volgen er nog specifieke eisen in de desbetreffende hoofdstukken voor energieberekeningen op basis van partiële bovenleiding of waterstof.

3 Status Zero emissie techniek

Dit hoofdstuk is opgedeeld in drie technische disciplines: batterijtechniek, Zero emissie Treinen en batterijbussen. Voor deze disciplines worden de laatste stand van zaken en de toekomstverwachtingen besproken (periode 2020-2035 en na 2035). De benodigde informatie is verzameld uit openbare bronnen en via het eigen netwerk/bedrijfsonderdelen van Arcadis en Ricardo. Voor het onderzoek naar treinmaterieel zijn de grote fabrikanten Alstom, Bombardier, CAF, Siemens en Stadler benaderd. De uitkomsten worden in volgende hoofdstukken gebruikt voor analyses.

3.1 Batterijtechniek

In deze paragraaf worden de laatste stand van zaken en de toekomstverwachtingen van de batterijtechniek in relatie tot het openbaar vervoer besproken.

3.1.1 Eigenschappen batterijen

Er zijn verschillende typen batterijen. Daarvan varieert de geschiktheid voor mobiliteitsoplossingen. In deze paragraaf zal dan ook worden beschreven welke batterij het meest geschikt is om te gebruiken bij een trein. De geschiktheid wordt beoordeeld op basis van een zestal eigenschappen:

- Capaciteit
- Vermogen
- Veiligheid
- Performance
- Levensduur
- Kosten

Voor bovenstaande eigenschappen zijn de volgende zaken van belang.

Energiedichtheid

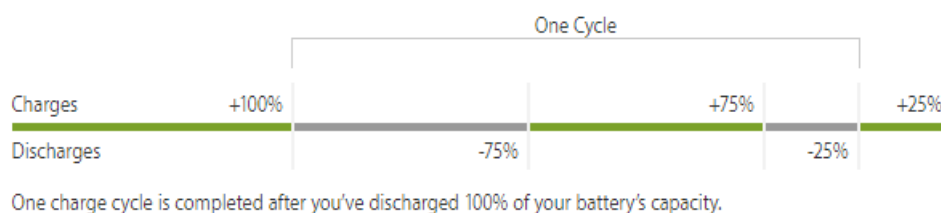
De energiedichtheid van een batterij is de hoeveelheid energie per massa- of volume-eenheid. De energiedichtheid geeft de maximale energie aan die er per kilogram of per liter in een batterij kan worden opgeslagen. Deze worden gegeven in Wh/kg en Wh/l.

End of Life (EoL)

De einde levensduur grens (EoL) wordt meestal gekozen op 80% van de initiële capaciteit, maar kan ook op een ander percentage gekozen worden. Een lager percentage geeft in de praktijk vaak problemen, omdat een lagere capaciteit er voor zorgt dat er vaker bijgeladen moet worden, waardoor de batterij sneller zal slijten en de levensduur en capaciteit nog sneller af zullen nemen. In de huidige studie wordt 80% aangehouden.

Cyclus levensduur

De levensduur van een batterij is gegeven in het aantal cycli. Dit is het aantal keren dat een batterij zijn volledige energie kan leveren voordat de capaciteit van de batterij gereduceerd is tot zijn EoL punt (80% van de oorspronkelijke capaciteit). Voor batterijen zonder geheugeneffect geldt dit ongeacht hoe vaak er tussentijds wordt bijgeladen. Eén keer 75% van de energie gebruiken, dan kort bijladen om vervolgens 25% van de energie te gebruiken is samen 100% van de energie en daarmee één cyclus. Het maakt niet uit hoe vaak er ontladen wordt, als de totale hoeveelheid gebruikte energie 100% van de batterijlading is dan geldt dat als één cyclus.



Figuur 2: Voorbeeld cycli

Depth of discharge (DoD)

DoD geeft aan hoever de batterij is ontladen als percentage van de maximale capaciteit van de batterij. Veelal geldt hoe dieper de batterij ontladen wordt, des te korter de levensduur.

State of charge (SoC)

State of Charge (SoC) is het huidige energieniveau uitgedrukt in een percentage van de maximale capaciteit van de batterij. Voor het bewaren van batterijen is het belangrijk de juiste SoC te hanteren om capaciteitsverlies te minimaliseren.

C-rate (en D-rate)

De C- en D-rate is een maat voor de maximale snelheid van op- (C) en ontlading (D) van een batterij. Dit is een belangrijke parameter voor opportunity charging, omdat er hierbij in korte tijd veel lading overgebracht kan worden. Bij 1C wordt een batterij in 1 uur opgeladen en bij 1D in 1 uur ontladen. Bij 2C wordt dezelfde batterij in 30 minuten opgeladen bij een stroom die twee keer groter is. Deze parameter wordt voor een batterij meestal weergegeven als 4C/8D. Niet alle batterijen zijn in staat om een C-rate hoger dan 2C hanteren. Verder geldt hoe hoger de C-rate, hoe lager de levensduur.

3.1.2 Batterijtypen

De batterijen voor vervoerstoeppingen zijn ruwweg onder te verdelen in [1]:

- Loodzuur batterijen
 - Conventioneel flooded
 - Enhanced flooded
 - Onderhoudsvrije Batterijen (VRLA)
 - GEL
 - AGM (Absorbant Glass MAT)
- Natrium batterijen
- Nikkel-type batterijen
 - Nikkel Cadmium
 - Nikkel Metaal Hydride (NiMH)
 - Nikkel Magnesium Cobalt (NMC)
 - Nikkel Kobalt-Aluminium Oxide (NCA)
- Lithium batterijen
 - Carbon Graphite (C) anode with Metal Oxide (MOX)-type kathode
 - Lithium Titanium Oxide (LTO) anode met en metal-oxide kathode

Er zijn meer typen batterijen met diverse varianten van materialen op de markt, maar de bovengenoemde typen zijn de belangrijkste. Hieronder worden de batterijtypen nader toegelicht.

Loodzuur batterijen

Loodzuur batterijen worden al geruime tijd toegepast. Dit batterijtype is betrouwbaar, kan onder zware omgevingscondities worden toegepast en heeft een lange levensduur. Nadelen zijn het benodigde onderhoud (geldt niet voor de GEL-batterijen), temperatuur gevoeligheid, het risico op (giftige) gasvorming, het beperkte aantal op- en ontladcycli (vooral bij hogere temperaturen) en het grote gewicht en volume.

Natrium batterijen

Natrium batterijen functioneren bij hoge temperaturen (270 °C – 350 °C). Ze hebben een hoge energiedichtheid, zijn relatief goedkoop en hebben geen uitstoot. Een nadeel is dat de kathode van de batterij oxideert en daarmee de effectiviteit van de batterij flink reduceert. Vanwege de hoge bedrijfstemperatuur zijn complexe veiligheidsmaatregelen nodig en lijken deze minder geschikt voor openbaar vervoer toepassingen.

Nikkel-type batterijen

Nikkel-type batterijen komen voor in de vorm van nikkel-cadmium, nikkel-metaal hydride, nikkel-waterstof en nikkel-zink batterijen. Deze batterijtypen worden toegepast in extreme klimaatomstandigheden, cyclische omstandigheden of snel-laadcondities. De batterijen zijn voor zowel hoge temperaturen als lage temperaturen geschikt en kunnen worden gerecycled. De capaciteit varieert van 0,5 Ah tot 2.000 Ah en het energierendement is, afhankelijk van de toepassing, meer dan 95%. Nadelen zijn de relatief hoge prijs, beperkte aantal op- en ontladcycli en het "geheugeneffect" waardoor capaciteit verloren kan gaan.

Lithium batterijen

Lithium batterijen worden gebruikt sinds de jaren '90 van de vorige eeuw en worden inmiddels veelvuldig gebruikt in allerlei toepassingen. Er zijn vele soorten lithium batterijen die allemaal hun eigen specifieke voor- en nadelen hebben. De belangrijkste typen zijn:

- Lithium - Grafiet/ NMC (NMC)
- Lithium - Titanaat - Oxide (LTO)

Lithium-ion batterijen worden inmiddels al veelvuldig in elektrische bussen toegepast. Dit batterijtype is compact en licht en heeft een hoge energie dichtheid.

3.1.3 Vergelijking batterijtypen

Al deze verschillende batterijtypen kunnen worden toegepast in de Zero emissie treinen. Hieronder vergelijken we ze op de belangrijkste eigenschappen [2].

	Loodzuur	Nikkel-Cadmium	Nikkel-metaal-waterstof	Lithium Grafiet/ NMC	Lithium Titanaat Oxide
Energiedichtheid	40 Wh/kg	45-60 Wh/kg	80 Wh/kg	120-200 Wh/kg	70-80 Wh/kg
Cycli	200-300	1.000-1.500	300-500	500-3.000	15.000-20.000
Laadvermogen	--	+-	+-	+-	++
Ontladingsvermogen	++	++	++	++	++
rendement	--	+-	+-	++	++
Nominale celspanning	2,0 V	1,2 V	1,2 V	3,6 V	2,3 V
Charge-rate	0.1C	0.2C	0.2-1C	1-2C	4-8C
Prijs € per kWh (cell) ⁴	257	400	350	200	600-800

Tabel 3: Loodzuur, Nikkel en Lithium-batterijen vergeleken

Uit de tabel blijkt in eerste instantie dat LTO-batterijen de meest geschikte batterijen zijn om te gebruiken voor Zero emissie treinen. NMC heeft een hogere energiedichtheid, maar op levensduur

⁴ Deze prijs is op basis van de losse batterijcel. Voor een complete module inclusief behuizing, batterij management systeem, koeling etc. gelden hogere prijzen

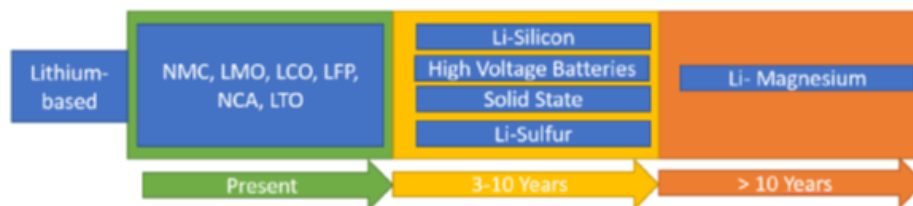
(cycli) en laadvermogen scoort LTO duidelijk beter. LTO-batterijen zijn duurder dan NMC-batterijen, maar dat wordt gecompenseerd door de langere levensduur en het feit dat LTO-batterijen in staat zijn om met een hoge C-rate op te laden (snelladen). De analyses in deze rapportage zijn daarom uitgevoerd met LTO batterijen. Echter, na discussies met de TU Eindhoven en een verdere analyse naar de combinatie van batterijcapaciteit, massa, oplaadsnelheid en prijs, blijkt dat de NMC batterijen een veelbelovend alternatief zijn. Doordat niet alleen de C-rate en het aantal cycli maatgevend zijn neemt het aantal opties toe en dus ook de optimalisatie mogelijkheden. In de automotive is dit een veel gebruikt batterij type. Aanvullend is daarom in bijlage G een analyse toegevoegd met NCM batterijen en is ook inzicht gegeven in verschil in kosten.

3.1.4 Toekomstige ontwikkelingen batterijen

Op dit moment zijn LTO-batterijen de beste keus voor toepassingen in het openbaar vervoer. Gezien de populariteit van elektrische voertuigen wordt er veel energie gestoken in de ontwikkeling van batterijen Hieronder worden de meest veelbelovende vooruitzichten gegeven.

Nieuwe lithium batterijtypen

Volgens [3] en [4] worden de volgende lithium batterijtypen als toekomstig beschouwd: lithium-lucht, lithium-metal, solid-state lithium, lithium-zwavel, lithium-ijzer, lithium-siliconen en lithium-magnesium. De energiedichtheid van deze batterijtypen varieert van 90 Wh/kg tot 400 Wh/kg [5]. Het aantal cycli is relatief laag en kan oplopen tot 2.500. Sommige van deze batterijtypen zijn al decennialang in ontwikkeling en het is de vraag of ze ooit op de markt komen. Deze batterijtypen worden voorlopig niet als serieuze optie gezien voor een Zero emissie trein.



Figuur 3: Ontwikkeling Lithium batterijtypen

Twee veelbelovende, noemenswaardige innovaties zijn:

- *Graphene ball*

De Graphene ball [6] toont veelbelovende prestaties. Dit batterijtype werkt met een charge-rate van 5C. Het wordt ontwikkeld door Samsung Advanced Institute of Technology (SAIT), maar is voorlopig nog niet klaar voor grootschalige productie. De Graphene ball is een innovatie die net als LTO op de anode van de batterij gericht is. Met deze technologie is een levensduur van 500 cycli mogelijk (met een charge-rate van 5C op 60 °C).

- *Aquabattery*

De Aquabattery [7] gebruikt brak water in plaats van chemicaliën en wordt ontwikkeld door een Nederlandse startup in samenwerking met de TU Delft. Het product staat echter nog in de kinderschoenen. De eerste pilot wordt momenteel gebouwd.

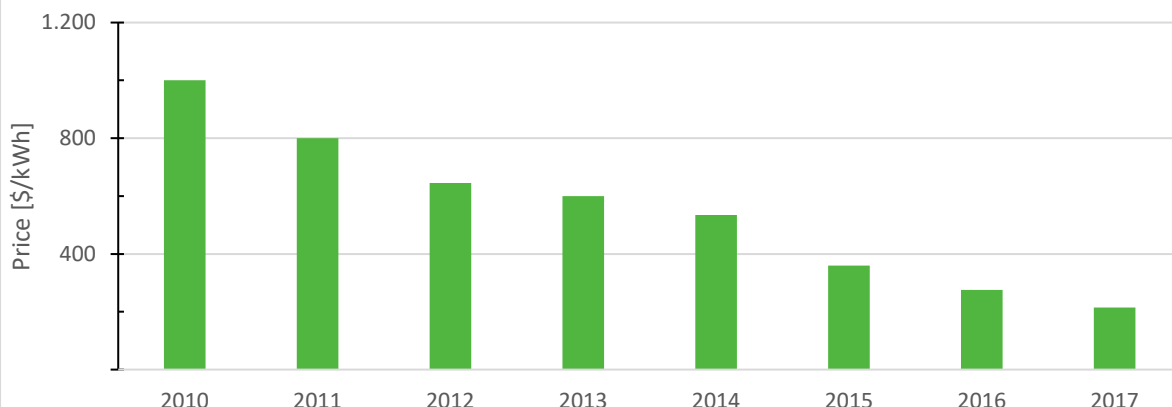
Deze innovaties zijn nog in de beginstadia van hun ontwikkeling. De verwachting is dat er geen grote doorbraak plaats vindt, maar dat er binnen de bestaande batterijtechnologieën kleine stappen gemaakt zullen worden waardoor de levensduur, de capaciteit en de charge-rate verder zullen verbeteren.

3.1.5 Prijsontwikkeling van de batterij

De ontwikkeling van de batterij gaat continu door. Dit heeft er in geresulteerd dat het aantal kWh per kg batterij is toegenomen en de kostprijs per kWh is afgenomen. In Figuur 4 is een overzicht opgenomen hoe de ontwikkeling van de kWh per kg en € per kWh de afgelopen decennia is verlopen.

Cheaper Batteries

Lithium-ion battery prices just keep falling. They're down 24% from 2016 levels.



Note: Figures are volume-weighted averages

Source: Bloomberg New Energy Finance survey of more than 50 companies

Bloomberg

Figuur 4: Batterij ontwikkeling afgelopen jaren (bron: Bloomberg [8])

Deze terugblik in het verleden geeft een indicatie wat de nog te verwachten ontwikkeling is voor de komende jaren. Zeker in combinatie met de toenemende vraag naar batterijen, waardoor de productie grootschaliger wordt, zullen de kosten verder dalen.

Levensduur

Voor het bepalen van de haalbaarheid in 2025 wordt de levensduur van de LTO batterij van Leclanché (Zie Bijlage A) [7] als uitgangspunt genomen met gemiddeld 20.000 cycli. Het aantal cycli bepaalt de levensduur van het batterijpakket.

Uit de analyse naar het energieverbruik (hoofdstuk 5 en bijlage Bijlage F Energiegebruik per traject) is bepaald hoeveel er dagelijks gemiddeld gebruikt wordt per trein. Bij de uitgangssituatie "normaal" is dit ~1500 kWh. Uitgaande van een batterijcapaciteit van 525 kWh betekent dit dat de 20.000 cycli na 19 jaar worden bereikt. Voor een concessie van 15 jaar moet aan de investeringskant in het voertuig dus worden uitgegaan van 1 batterijpakket per concessie.

De levensduur van lithium batterijen is afhankelijk van diverse factoren. De levensduur kan verlengd worden door de batterijen in hun meest gunstige omstandigheden te gebruiken. Afhankelijk van hoe diep de batterij ontladen wordt (DoD), zullen ze langer of minder lang mee gaan. Ook de laadsnelheid (C-rate) en de temperatuur zijn van invloed op de levensduur. Hiervoor geldt, hoe hoger de laadsnelheid en/of temperatuur, des te korter de levensduur.

Voor LTO en NMC type batterijen ziet de levensduur als functie van DoD er als volgt uit:

Depth of discharge	Discharge cycles (NMC / LiPO4) @1C	Cycles @1C (LTO) *Xalt	Cycles @4C (LTO) *Leclanche
100% DoD	~300 / 600	60,000	15,000
80% DoD	~400 / 900	90,000	21,000
60% DoD	~600 / 1,500	135,000	29,000
40% DoD	~1,000 / 3,000	?	?
20% DoD	~2,000 / 9,000	?	?
10% DoD	~6,000 / 15,000	?	?

Tabel 4: Levensduur als functie van de DoD

Beschikbaarheid batterijen

LTO-batterijen worden vervaardigd door een paar fabrikanten. De grootste zijn Leclanché (zie Bijlage A), Toshiba (zie Bijlage B), Xalt Energy, Kokam en Altairnano. Bij het bestellen van batterijpakketten raden we aan dit tijdig te doen i.v.m. de beperkte productiecapaciteit van de fabrikanten.

Conclusie

Om succesvol met een batterijtrein te kunnen rijden moet het batterijpakket voldoen aan de volgende voorwaarden:

- Er moet in korte tijd veel energie bijgeladen kunnen worden.
- De batterij moet lang mee gaan. Bij voorkeur net zo lang als de levensduur van een trein (ongeveer 30 jaar).
- De batterij moet een voldoende hoge energiedichtheid hebben vanwege beperkingen in de beschikbare ruimte en het gewicht.
- De batterijen moeten een goede prijs-prestatie-verhouding hebben.

Rekening houdend met deze voorwaarden lijken de LTO-batterijen de meest geschikte keuze. LTO-batterijen voldoen aan vrijwel alle genoemde voorwaarden. LTO-batterijen zijn duurder dan NMC batterijen, maar dat wordt gecompenseerd door de langere levensduur. Ook zijn NMC-batterijen (en andere lithium batterijtypen) niet in staat om met een C-rate van 4C op te laden.

3.1.6 Kosten prognose nu - 2035

Er zijn diverse onderzoeken uitgevoerd naar de kosten van lithium batterijen. [8] geeft een voorspelling van de prijs voor Lithium Nikkel Cobaltoxide en Mangaan (NCM)-type batterijen in \$/kWh waarbij wordt gesteld dat de prijs niet voor 2020-2025 onder de 100 \$/kWh komt voor de NCM-lithium-batterij en voor de grafiet lithium niet voor 2025-2030. De huidige prijs van een lithium batterij van Tesla is 150 \$/kWh. Let wel, dit zijn de prijzen voor losse batterijcellen zonder batterij management systemen of behuizingen en aansluitingen. Voor complete batterijmodules inclusief deze systemen liggen de prijzen voor NMC op 500-600 €/kWh en voor LTO varieert de prijs tussen 1000-1.500 €/kWh (bron: Stephan Kolly, Leclanche). De verwachting van fabrikanten is dat de prijzen voor lithium batterijen op de hele korte termijn zullen stijgen, omdat er nu een enorme vraag is en slechts nog een beperkt aanbod. De schaarste van de ruwe materialen zal ook voor een prijsstijging zorgen. De verwachting is wel dat op de iets langere termijn de prijzen van lithium batterijen wel verder omlaag zullen gaan, omdat deze steeds meer toegepast worden en onder andere Tesla een Giga-factory aan het bouwen is voor Lithium batterijen. De meeste voorspellingen gaan uit van 100 \$/kWh in 2025. Als de lijn van 1.000 \$/kWh in 2010 en 100 \$/kWh in 2025 zich doorzet, zal de prijs voor NMC cellen in 2035 onder de 50 \$/kWh liggen.

Voor de ombouw van de treinen in 2023 is, na discussies met de TU Eindhoven (Auke Hoekstra), voor deze studie aangenomen dat de verwachte prijs van batterijmodules voor NCM batterijen op 250 €/kWh ligt en voor LTO batterijen op 900 €/kWh. Met deze prijzen zijn de kostenanalyses doorberekend.

3.2 Zero emissie Treinen

In deze paragraaf worden de laatste stand van zaken en de toekomstverwachtingen van treinen zonder uitstoot (batterij/waterstof) besproken. Dit wordt gedaan door in te gaan op de technische haalbaarheid. Eerst worden beide technieken toegelicht en vervolgens worden de marktontwikkelingen beschreven.

3.2.1 Technische haalbaarheid

3.2.1.1 Batterijtreinen

Geconcludeerd kan worden dat anno 2018 er nog geen uitgebreide commerciële inzet van batterijtreinen is. De ruimste inzet is te vinden in Japan waar nu in totaal 16 treinstellen van elk 2 rijtuigen vanaf 2014 in commerciële dienst zijn. In Europa is tot nog toe slechts sprake van enkele proeftrajecten in Engeland en Duitsland. Voor de Oostenrijkse spoorwegmaatschappij ÖBB loopt op

dit moment een bestelling die tot 300 treinstellen stellen kan oplopen. De inzet is vanaf 2019 gepland.

Batterijen als energieopslag vindt een bredere commerciële toepassing in trams. Door de geringere massa van de voertuigen (ten opzichte van treinen) en lagere gemiddelde snelheid is de energiebehoefte geringer. In diverse steden in Europa en in de rest van de wereld rijden inmiddels batterijtrams. Zij vormen een fraai alternatief voor de oude binnensteden waar de elektrische infrastructuur in de vorm van bovenleiding als ontsierend wordt gezien. De lithium batterijen worden in deze toepassing veelvuldig gecombineerd met supercaps. Supercaps zijn, beter dan batterijen, in staat om grotere vermogens te verwerken. Ze worden dan ook gebruikt om de batterijen, waarin de bulk aan energie wordt opgeslagen, te ondersteunen bij het aanzetten en remmen van de voertuigen.

In Japan zijn inmiddels een 3-tal treinseries in commerciële dienst. Het betreft dan de series:

- EV-E301, in dienst sinds 2014, Kyushu Railway.

De serie bestaat uit in totaal 8 treinstellen van 2 rijtuigen, die worden ingezet op de Karasuyama – lijn. De laatste circa 20 km van het verder geëlektrificeerde traject worden op een 190 kWh Li-Ion Batterij gereden. Het laden van de batterij gebeurt op het geëlektrificeerde deel van het traject en op het eindstation met 1.500 Volt gelijkstroom onder een stroomrail. Dit systeem voor opportunity charging is voor Nederland interessant omdat het gelijk is aan de reguliere bovenleidingsspanning. Vanwege de laadstromen ligt een stroomrail voor de hand om plaatselijke opwarming van een bovenleidinggijdraad en daarmee versnelde slijtage te voorkomen. De maximale snelheid op de batterijen is circa 65 km/u.

- BEC 819, in dienst sinds 2016, Kyushu Railway.

De serie bestaat uit in totaal 7 treinstellen van 2 rijtuigen, die worden ingezet op de Wakamatsu – lijn. Dit traject van circa 11 km is niet geëlektrificeerd. De treinstellen zijn uitgerust met een Li-Ion batterij van 360 kWh. Het laden van de batterij gebeurt op het eindstation en op het geëlektrificeerde deel van treinservice aansluitend op de Wakamatsu – lijn met 20 kilovolt wisselstroom.

- EV-E801, in dienst sinds 2017, East Japan Railway.

Het betreft 1 treinstel van 2 rijtuigen die ingezet wordt op de Oga – lijn. De laatste circa 25 km van het verder geëlektrificeerde traject worden op een 360 kWh Li-Ion Batterij gereden. Het laden van de batterij gebeurt op het geëlektrificeerde deel van het traject en op het eindstation met 20 kilovolt wisselstroom. De maximale snelheid op de batterijen is ongeveer 85 km/u.



Figuur 5: EV-E301-1 tijdens het laden [9]

In de bovenbeschreven projecten vindt energieopslag plaats middels een Lithium batterij ter grootte van enkele 100 kWh. Daarbij is volgens de literatuur een actieradius mogelijk tot 90 km. Laden van de batterij geschied bij het remmen (de remenergie wordt dan via de tractiemotoren terug geleverd), tijdens verkeer op het geëlektrificeerde deel van het bereden traject en op de eindstations waar specifieke (snel)laadstations zijn aangebracht.

Overzicht gerealiseerd materieel

Type	Waar	Inzet	Vanaf	Fabrikant	Bron	Type batt	E [kWh]	AR [km]
EV-E301	Japan	comm	2014	J.TREC	Batterij	Li-ion	190	20
BEC 819	Japan	comm	2016	Hitachi	Batterij	Li-ion	360	25
EV-801	Japan	comm	2017	Hitachi	Batterij	Li-ion	360	25
Electrostar	U.K.	proef	2015	Bombardier	Batterij	Li-Fe-Mg	450	50
iLint	Duitsland	proef	2017	Alstom	Batterij	Li-ion	400	1.000
					Brandstofcel	PEM	180 kg H ₂	
Talent 3	Duitsland	proef	2019	Bombardier	Batterij	Li-ion	n.b.	40

Tabel 5: Overzicht gerealiseerd materieel

Twee algemene trends in batterijtechnologie en elektrisch rijden, deels aangewakkerd door de auto-industrie en de energietransitie in het algemeen, zijn de verdere verbetering van batterijtechnologie en het verbeteren van de energie-efficiëntie.

Verbeteringen van de batterijtechnologie zijn onder andere gericht op de thema's (brand)veiligheid, capaciteit (met een zo laag mogelijk gewicht en volume) en levensduur. Zie ook Paragraaf 3.1.

Verbeteringen van de energie-efficiëntie zijn er onder andere op gericht energieverliezen te minimaliseren of energie terug te winnen. Voorbeelden hiervan met wisselende terugverdiendtijd zijn het verlagen van de rijweerstand en het optimaliseren van het hulpverbruik van vooral comfortfuncties. Het terugwinnen van remenergie is gebruikelijk in elektrische treinen en wordt recuperatie genoemd.

3.2.1.2 Waterstoftreinen

Voor waterstoftreinen kan net als voor batterijtreinen eveneens geconcludeerd worden dat er in 2018 geen commerciële inzet plaatsvindt. Wel is vanaf 2021 een commerciële inzet gepland in Duitsland en vanaf 2022 in Oostenrijk. Tevens zijn er concrete plannen in het Verenigd Koninkrijk. Het concept van de trein bestaat doorgaans uit een energieopslag (batterij en/of supercaps) in combinatie met een brandstofcel. De brandstofcel voedt de energieopslag, die daarnaast wordt gebruikt om de remenergie op te slaan. Brandstofcellen opereren het beste met een constante output zonder piekbelastingen; die dienen te worden opgevangen.

3.2.2 Markontwikkelingen

Stadler

De Zwitserse treinenbouwers Stadler heeft zich in de afgelopen decennia ontwikkeld als zeer grote speler op de markt. Door haar modulaire bouwwijze, ervaring met kleine series en vaak snelle levertijden heeft zij voor vervoerders aansprekende producten. Op gedecentraliseerde spoorlijnen in Nederland is veruit het grootste deel van de reizigerstreinen gebouwd door Stadler. In Groningen en Fryslân zijn momenteel alle huidige treinen van Arriva van het type GTW van Stadler en er komen nog treinen bij van het type WINK.

Huidige GTW-materieel

Het huidige GTW-materieel dateert maximaal van 2006. Het materieelpark in Groningen en Fryslân omhelst op dit moment in totaal 51 treinstellen, waarvan 14 met twee rijtuigen en 37 met drie rijtuigen. In 2022/2023 komen hier nog 3 vergelijkbare treinstellen bij die nu nog in Limburg rijden. De treinstellen worden in de huidige situatie aangedreven door een power pack die is voorzien van

twee MAN dieselgeneratoren welke voldoen aan de Euro 3b-norm. De dieselgeneratoren drijven elk een dynamo aan waarmee de elektromotoren op de assen van het power pack worden gevoed. De treinstellen kennen een topsnelheid van 140 km/u en bieden afhankelijk van de configuratie 100 tot 172 zitplaatsen.



Figuur 6: Huidig GTW-materieel [10]

Hybride GTW-materieel

De GTW's van Arriva worden de komende jaren voorzien van batterijen om de remenergie op te vangen. Deze wordt vervolgens gebruikt om de dieselgeneratoren bij langere stops uit te kunnen schakelen, terwijl de installaties in de trein zoals verlichting en klimaatbeheersing blijven functioneren.

Waterstof GTW-materieel

Stadler is momenteel bezig met het ontwikkelen van een GTW op waterstof op basis van de huidige GTW-stellen van onder andere Arriva. De dieselgeneratoren uit het power pack worden daarbij vervangen door brandstofcellen, op het dak van de rijtuigen worden waterstoftanks geplaatst en er is energieopslag, alles in lijn met het conceptontwerp zoals voorgesteld in de Arcadis-studie van 2016.

WINK materieel

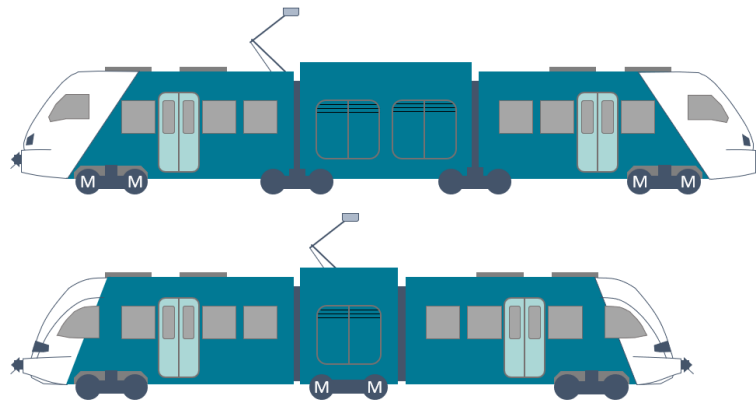
Arriva heeft bij Stadler 18 WINK (Wandelbarer Innovativer Nahverkehrs-Kurzzug; flexibele innovatieve korte-afstandstrein) treinstellen besteld (eerder bekend als Flirtino's) voor de treindienst Groningen-Leeuwarden. Bij aflevering zijn de treinstellen voorzien van een Deutz dieselgenerator die wordt gevoed met HVO biodiesel, wat volgens Arriva een CO₂ reductie van 80% genereert ten opzichte van reguliere diesel. HVO staat voor Hydrotreated Vegetable Oil: een olie op dierlijke en plantaardige vetten die met waterstof is behandeld. De olie wordt gemaakt van afval- en reststromen zoals afgewerkt frituurvet, dierlijke vetten of houtpulp. Daaruit wordt een synthetische diesel gemaakt met een hogere zuiverheid en efficiëntie dan reguliere diesel.

De WINK treinstellen kunnen worden omgebouwd naar treinen met een aandrijving op batterijen in combinatie met partiële bovenleiding of brandstofcellen.



Figuur 7: WINK materieel (afbeelding Stadler)

Deze treinstellen combineren FLIRT rijtuigen met een power pack in het midden. In tegenstelling tot de GTW, waarbij het power pack maar twee assen heeft, heeft de WINK twee draaistellen onder de power pack. Daarnaast zijn de aangedreven draaistellen, in tegenstelling tot de GTW, onder de koprijtuigen geplaatst, zoals bij FLIRT materieel. Het grote voordeel van de WINK is dat er door de extra assen en opzet de aslast lager is. Daardoor en dankzij de lengte van het power pack is er meer ruimte en gewicht beschikbaar voor alternatieve aandrijftechnieken. Op onderstaande figuur worden de WINK en GTW vergeleken, hierbij is de locatie van de aangedreven draaistellen (met een M van motor) en de configuratie van de powermodule weergegeven.



Figuur 8: schematische weergave WINK (boven) versus GTW (onder)

Overige ontwikkelingen bij Stadler

In Oostenrijk is het de bedoeling om de bestaande smalspoortrein op diesel in het Zillertal te vervangen door een trein op waterstof. De Zillertalbahn loopt in Tirol door het dal tussen de plaatsen Jenbach en Mayrhofen en is 36 km lang. De planning is om in 4 jaar (vanaf februari 2018) een prototype trein te ontwikkelen, op basis daarvan de vijf commerciële treinstellen te bestellen en de lokale waterstofproductie-eenheid te bouwen in Mayrhofen. De treinen worden voorzien van vier brandstofcellen van 100 kW, twee bufferbatterijen van 42 kW en twee hoofdbatterijen van 300 kW. De capaciteit van de waterstoftanks bedraagt 150 kg onder een druk van 350 bar. Een volledige dag rijden met ingeschakelde klimaatinstallatie kost circa 600 kg waterstof. Door over te stappen op waterstof wordt jaarlijks 2160 ton CO₂ en 800.000 liter diesel bespaard. De totale investering in de treinen is geschat op € 80 miljoen en als alles volgens plan verloopt rijdt de Zillertalbahn vanaf 2022 geheel op waterstof.



Figuur 9: Ontwerp prototype waterstoffrein Stadler

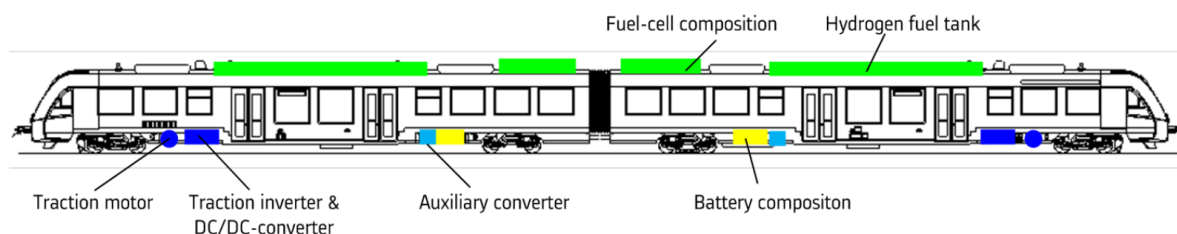
Alstom

De van origine Franse treinenbouwer Alstom heeft een groot scala aan treinen in haar assortiment en is op de Nederlandse regionale lijnen vooral bekend van de Lint-treinstellen die afkomstig zijn van haar Duitse productielijn.

Alstom iLint

De eerste "dedicated" waterstofftreinen rijden inmiddels alweer enkele jaren als prototypes rond en zijn recent officieel toegelaten in Duitsland. Een proefbedrijf met reizigers heeft plaatsgevonden in augustus 2018. Serieproductie start in 2019 met geplande instroom in de treindienst vanaf 2021. Tijdens het proefbedrijf werden nog tubetrailers gebruikt (waterstoftankwagens) voor de levering van de waterstof aan de treinen, maar in de reguliere treindienst is een vast tankstation voorzien.

Ten opzichte van de prototypes nemen de serietreinstellen meer waterstof mee (180 kg in plaats van de 130 kg) en dat is verder uitbreidbaar. Volgens Alstom krijgt de waterstof trein daarmee een bereik tot meer dan duizend kilometer. Dit komt in de buurt van het bereik van de huidige dieseltrein op de lijnen in Groningen en Fryslân. Aan de hand van het onderstaande plaatje wordt de technische opbouw van de trein verder toegelicht [11].



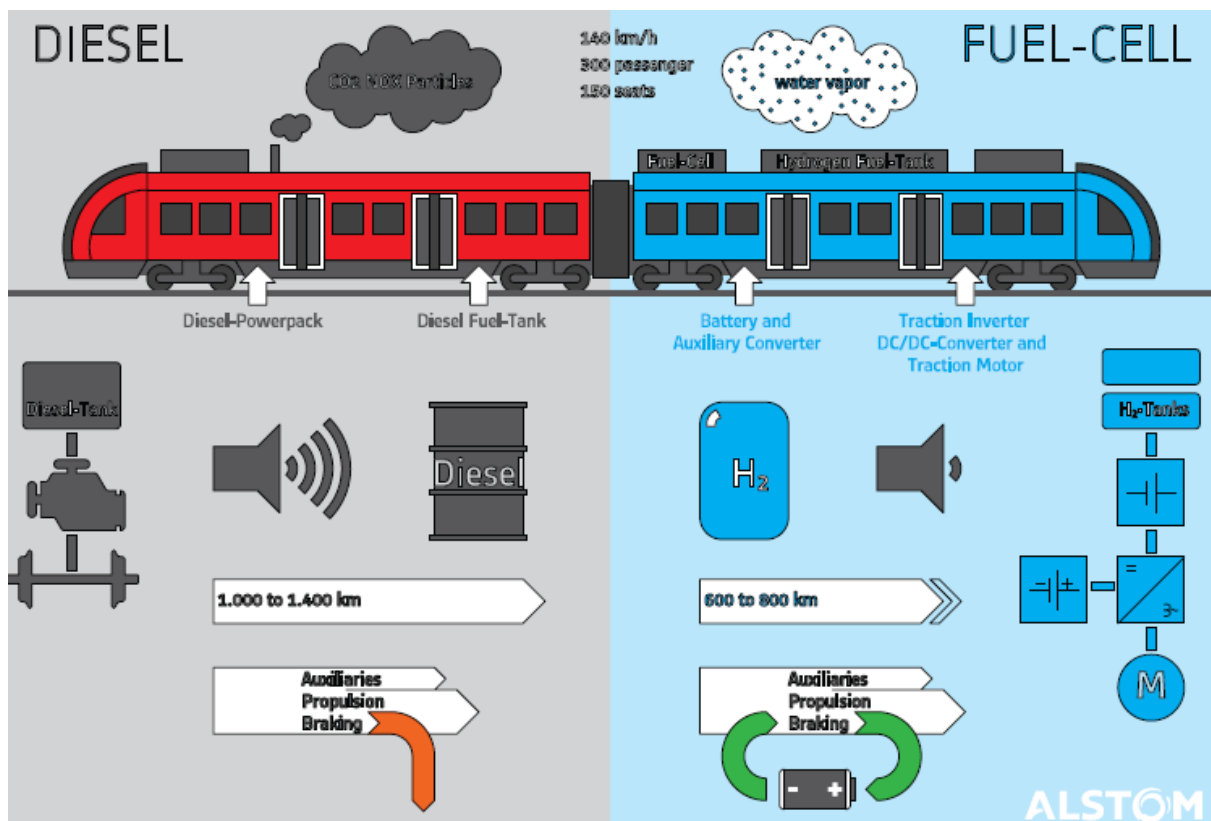
Figuur 10: Indeling Coradia iLint, tijdens testfase in Salzgitter

Achtergrond

Eén van de reizigerstreinen die Alstom op grote schaal bouwt is de Coradia Lint. Deze is gekozen als basismodel voor een variant met een aandrijving op basis van waterstof. De onderzoeksfase is grotendeels afgerond, het ontwerp is doorontwikkeld en op dit moment is de seriebouw gestart. Dat betekent dat er gesteld kan worden dat een waterstofftrein technisch haalbaar is.



Figuur 11: Prototype Coradia iLint, tijdens testfase in Salzgitter



Figuur 12: Globale vergelijking diesel- en waterstofuitvoering Coradia

Huidige status

In april 2018 heeft de Coradia iLint een testrit gemaakt op het traject Wiesbaden-Frankfurt als demonstratie ter voorbereiding van de exploitatie in de treindienst in Nedersaksen. De focus ligt op basis daarvan de komende tijd op het oplossen van de laatste kinderziektes, zoals een in de trein hoorbare hinderlijke brom in de omgeving van de brandstofcel.

Vervolgstappen

De regionale overheid heeft bij Alstom 14 waterstoftreinen besteld. Het plan is om deze vanaf 2021 in te zetten in de reguliere treindienst. Voor de toekomst is het de bedoeling om de waterstof groen te produceren op basis van elektriciteit uit windturbines. Het uitgangspunt daarbij is dat 10 MW aan windturbinevermogen voldoende is om 15 treinen te laten rijden. De totaalkosten voor de aanschaf van 14 treinen zijn niet gepubliceerd. Wel is er duidelijk dat de regionale regering bij deze order € 81,3 miljoen aan subsidie inbrengt.

Certificering en toelating

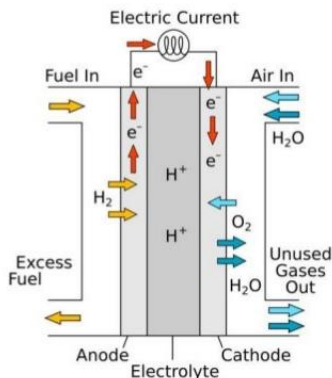
Certificering van de afzonderlijke onderdelen van de trein is verricht door TÜV Süd (Technischer Überwachungsverein; Duitse controlevereniging), namelijk voor de batterij, het tanksysteem en de brandstofcellen. De toelating op het Duitse spoorwegnetwerk vond plaats op 11 juli 2018 door de EBA (Eisenbahn Bundesamt).

Waterstoftank

Waterstof wordt in de iLint opgeslagen onder een druk van 350 bar. De waterstoftanks op het dak bestaat uit 2 compartimenten die ieder 90 kg kunnen bevatten. Deze tanks hebben een binnenvoering van polymeer, zijn bedekt met in hars gedrenkte koolstofvezels en gewikkeld in glasvezel. Zuurstof wordt uit de lucht gehaald, waardoor er geen aparte zuurstoftank nodig is. De trein wordt getankt door een tankopening aan de zijkant van de trein.

Brandstofcel

De brandstofcellen met een capaciteit van 200 kW per rijtuig bevinden zich ook op het dak van de trein. Het principe van de brandstofcel is de omzetting van H_2 (waterstof) en O_2 (zuurstof) in H_2O (water) + elektrische energie, zoals te zien is in de onderstaande afbeelding.



Figuur 13: Schematisch overzicht van het chemische proces in een brandstofcel

Grote producenten van brandstofcellen zijn onder andere Hydrogenics (leverancier van de Hydrogenics Heavy-Duty brandstofcellen op de iLint) en Ballard, die beiden ook in de railsector actief zijn. Vanuit Nederland is Nedstack (afgesplitst van AKZO) een mondiale speler. Nedstack richt zich momenteel vooral op de bussector.

Batterij

Naast de brandstofcel heeft de Coradia iLint per rijtuig een lithium batterij met een vermogen van 225 kW en een capaciteit van 200 kWh aan boord die energie opslaat tijdens het remmen alsmede overvloed vanuit de brandstofcel. De trein wordt dus aangedreven op basis van energie uit de brandstofcel en de batterij, indien voldoende opgeladen. Het totale vermogen bedraagt daardoor 850 kW.

Overige ontwikkelingen bij Alstom

In het Verenigd Koninkrijk is Alstom een samenwerking met Eversholt Rail aangegaan om overbodige elektrische treinstellen class 321 naar waterstofftreinen om te bouwen. Treinstellen van het type class 321 in het Verenigd Koninkrijk zijn maximaal 30 jaar oud, maar beschikken over uitstekende rij- en remeigenschappen alsmede een sterke constructie. In 2021 is de eerste trein volgens planning omgebouwd en uiteindelijk is het mogelijk om het hele park (117 treinstellen van 4 rijtuigen) om te bouwen. De topsnelheid bedraagt 140 kilometer per uur en het bereik is circa 1.000 kilometer. De aandrijflijn is hierbij vergelijkbaar met de iLint. De iLint wordt daarnaast aangeschaft voor het traject Londen-Manchester (Midland Main Line), als alternatief voor het elektrificeren van de lijn.

Bombardier

Het Canadese Bombardier heeft meerdere vestigingen in Europa en produceert naast trams, locomotieven en hogesnelheidstreinen ook regionale treinen. De Talent-familie is het bekendste en deze komt met grensoverschrijdende diensten ook in Nederland.

Talent 3

De ÖBB in Oostenrijk heeft een raamovereenkomst met Bombardier voor de levering van mogelijk 300 stellingen van de serie "Talent 3", waarvan een deel mogelijk met batterijen zal worden uitgerust. Op 12 september 2018 is het eerste Talent 3 treinstel dat zowel op bovenleiding als op batterijen kan rijden gepresenteerd. Deze zal in 2019 als "demonstratie" proef een jaar lang in commerciële dienst ingezet worden in Baden – Württemberg. Het prototype kan op een volle lading 40 kilometer autonoom rijden, maar de generatie die in 2019 volgt heeft een bereik van 100 kilometer volgens Bombardier. Deze treinen kunnen rijdend onder bovenleiding hun batterijen opladen.



Figuur 14: batterij-hybride Talent 3

Overige ontwikkelingen bij Bombardier

In Engeland werd in 2015 een "Class 379 – Electrostar" treinstel door Bombardier omgebouwd en voorzien van een Lithium IJzer Magnesiumfosfaat batterij. Hiermee is gedurende een periode van 5 weken een commerciële treinservice gereden tussen Manningtree en Harwich. De Class 379 is een treinstel met 4 rijtuigen. De batterij heeft een energieopslag van 450 kWh dat voldoende moet zijn voor een actieradius van zeker 50 km. De trein kan op de batterij een snelheid van 120 km/u ontwikkelen. Het laden van de batterij gebeurt zodra er bovenleiding aanwezig is.

CAF

CAF was gecontracteerd voor het ombouwen van door hen eerder geleverde treinen naar batterijtreinen in Nieuw-Zeeland. Echter, bij dit project is uiteindelijk gekozen voor elektrificatie van het traject in plaats van ombouw van de treinen. Verder zijn er geen batterijmaterieel projecten van CAF bekend.

Siemens

Siemens heeft het Sitras SES/HES platform dat een combinatie is van batterijen en supercaps. Dit is toepasbaar op treinen en statisch in bijvoorbeeld onderstations. Verder zijn ze op het gebied van materieel bezig met de ontwikkeling van het Mireo platform waarin de Sitras HES wordt toegepast. Als alternatief zijn ze een verbinding aangegaan met Ballard om een nieuw type brandstofcel te ontwikkelen. De ontwikkeling van deze waterstoffrein met een topsnelheid van 160 km/u wordt door de Duitse overheid gesponsord met een subsidie van circa € 12 miljoen.



Figuur 15: Artist impression van Siemens Mireo

Ook voor Siemens zijn er verder geen gerealiseerde batterijmaterieel-projecten bekend.

Doorkijk naar de toekomst

Het spoorvervoer kende tot op heden met name elektrische aandrijving middels een bovenleiding of door middel van diesel. Op niet-geëlektrificeerde spoorlijnen was de keuze daardoor jarenlang diesel, met enige variatie in aandrijftechniek (dieselelektrisch, -hydraulisch of -mechanisch). Ten einde CO₂ te besparen en het gebruik van fossiele brandstoffen te beperken zijn er ontwikkelingen om het verbruik te reduceren en of de motor schoner te maken of om geheel over te stappen naar uitstootvrije vormen van treinvervoer. Hierbij wordt veelal meegelift op ontwikkelingen in andere branches zoals de auto branche waarbij veel innovaties plaatsvonden die uitstoot reduceren bij auto's, vrachtwagens en bussen. De toegepaste technieken zijn vaak modulair en, op grotere schaal, ook toepasbaar in het railvervoer.

Conclusie

Ondanks vele ontwikkelingen op de markt is Zero emissie treinverkeer zonder bovenleiding in Noord Nederland, nog niet eerder op een dergelijke schaal vertoond. Het is technisch zeker haalbaar, maar daarvoor dienen stappen genomen te worden met risico's op het vlak van techniek, toelating, aansluitingen. Een volledige introductie van dergelijke nieuwe technieken voor 2035 of zelfs 2025 is qua planning zeer uitdagend.

3.3 Batterijbussen

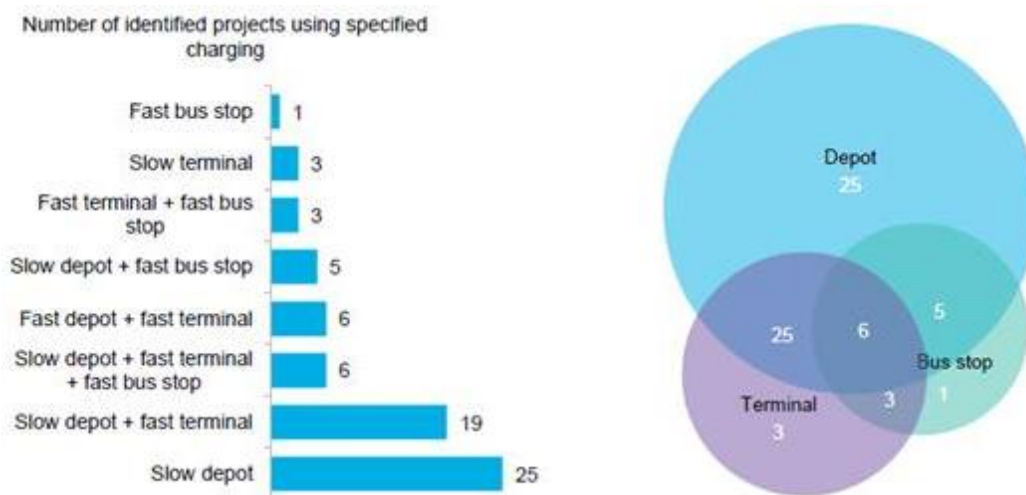
In deze paragraaf worden de laatste stand van zaken en de toekomstverwachtingen van batterij/elektrische bussen besproken. Dit wordt gedaan aan de hand van laadtechnieken en laadstrategieën, 'state of the art' batterijbus-projecten en de verwachten ontwikkelingen richting 2035. Ontwikkelingen bij bussen leveren inzichten op die gebruikt kunnen worden voor treinen.

3.3.1 Laadstrategieën voor batterijbussen

De volgende laadstrategieën worden voor batterijbussen over het algemeen toegepast:

- **Overnight charging:** Het voertuig wordt buiten de dienst (meestal in de nacht) opgeladen. Tijdens de dienst wordt het voertuig niet bijgeladen;
- **In-motion charging:** Het voertuig wordt opgeladen door draadloze energieoverdracht waarvoor voorzieningen in het wegdek zijn aangebracht of door een partiële bovenleiding;
- **Opportunity charging:** Er wordt bijgeladen op momenten waarbij de mogelijkheid zich voordoet. Bijvoorbeeld bij haltingen langs de route of op eindhaltepunten;
- **Battery swapping:** Hierbij wordt de complete batterijpakket vervangen, waardoor de batterijbus in korte tijd een volle batterij aan boord heeft [12].

Uit een inventarisatie van een reeks Europese batterijbus-projecten door [8] blijkt dat in het merendeel van de projecten opportunity charging wordt toegepast, zoals de te zien is in Figuur 16. Opportunity charging wordt vaak aangevuld met andere laadtechnieken. Het wordt vaak gecombineerd met snelladen tijdens de dienst in combinatie met langzaam laden in het depot. Hier wordt voor gekozen, omdat ondanks het overdag bijladen het batterijniveau gedurende de dag afneemt.



Source: Bloomberg New Energy Finance. Note: this is not an exhaustive list of e-bus projects. Data is from the ZeEUS (Zero Emission Urban Bus System) project, an EU funded project focusing on the challenges of the electrification of bus systems with an objective of collecting statistically valid data from the deployment of e-bus systems and then analyzing the data to deliver a "lessons learned" guidelines. Terminal refers to the last stop on buses' route, where layover happens.

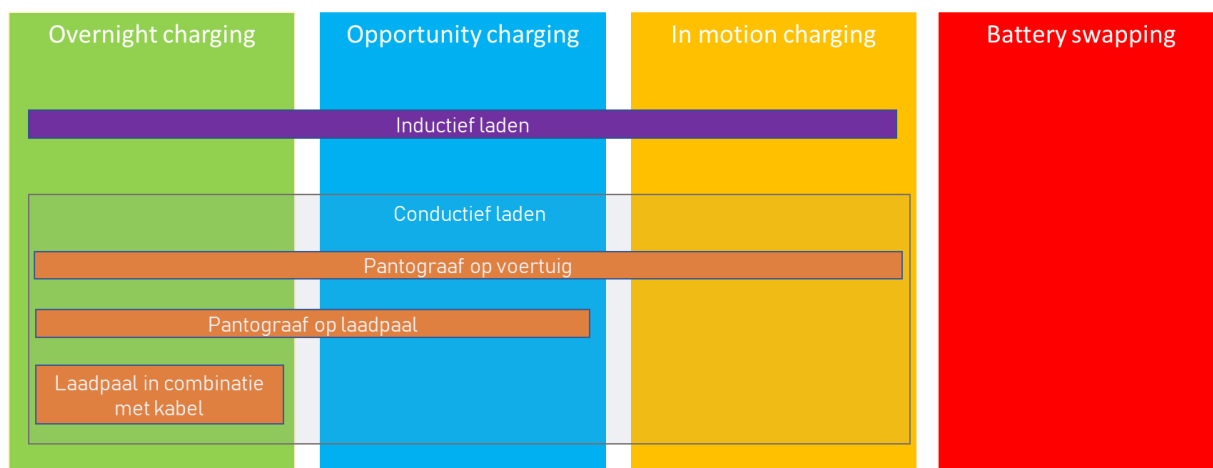
Figuur 16: Overzicht van toegepaste laadstrategieën in Europese batterijbus-projecten [8]

Bij opportunity charging wordt de omvang van het batterijpakket kleiner in verhouding tot overnight charging, omdat de batterijen overdag tussentijds opgeladen worden. Het toepassen van opportunity charging gaat echter gepaard met hogere kosten voor de laadpalen met pantograafsystemen of inductieve laadfaciliteiten. Optimalisatie van het aantal laadpalen en de batterijcapaciteit is mede afhankelijk van de factoren: Af te leggen afstand, passagierscapaciteit, topografie van de route, maximaal laadvermogen, koel en verwarmingsbehoefte en benodigde reservecapaciteit voor noodsituaties.

Opportunity charging wordt gezien als de meest veelbelovende laadstrategie voor busvervoer. In recente Nederlandse batterijbus-projecten in Amsterdam, Eindhoven, Groningen en Den Bosch wordt opportunity charging toegepast.

3.3.2 Laadtechnieken voor batterijbussen

Er zijn diverse laadtechnieken beschikbaar voor elektrische bussen. Er kan een onderscheid gemaakt worden tussen conductieve en inductieve laadtechnieken. De onderstaande figuur geeft een overzicht van de laadstrategieën en de toepasbaarheid van verschillende laadtechnieken. Deze worden verder toegelicht in de onderstaand tekst.



Figuur 17: Overzicht van laadstrategieën en de toepasbaarheid van diverse laadtechnieken

3.3.2.1 Conductief laden

Bij conductief laden wordt energie overgedragen doormiddel van een elektrisch geleidend voorwerp (bijvoorbeeld. een pantograaf). Binnen de categorie van conductief laden zijn de volgende technieken beschikbaar:

- Combinatie van laadpaal en pantograaf
 - Laadpaal uitgerust met pantograaf
 - Batterijbus uitgerust met pantograaf
- Combinatie van laadpaal en kabel

Combinatie van laadpaal en pantograaf

Een pantograaf maakt elektrisch contact tussen laadpaal en batterijbus. Het contact maken gebeurt (semi)-automatisch door een druk op de knop en neemt enkele seconden in beslag (gebruikelijk 4 s maar 1 s is mogelijk [13]). Dergelijke systemen werken op een spanning tussen de 460 V en 800 V [14] en er kan geladen worden met stromen tot 1.000 A (voor een duur van 30 seconden). Bij lagere stromen duurt het laden langer. Hoe snel er geladen kan worden varieert per type pantograaf, zie onderstaande tabel voor meer informatie. Stadler heeft eerder voor Arriva een GTW concept uitgewerkt waarbij in korte tijd 1,2 MW kan worden overgedragen bij een spanning van 750 V met een maximale stroomsterkte van 1.700 A [10].

Type nr.	Bus montage / 'drop-down'	Max hoogte	Maximaal vermogen
SLS 102	Bus montage	2.200 mm	750 kW
SLS 103	Bus montage	n.a.	1 MW
SLS 202	Drop-down	n.a.	500 kW

Tabel 6: Overzicht van typen pantografen [13]

Laadpaal uitgerust met pantograaf

Deze techniek bestaat uit een laadpaal met pantograaf, waarbij de pantograaf contact maakt met een contactpunt op het voertuig. Deze methode levert gewichtsbesparing op voor het voertuig omdat het contactpunt ongeveer 15 kg weegt ten opzichte van een referentiegewicht van een pantograaf van circa 100 kg. Het consortium Oppcharge [15] heeft met diverse marktpartijen deze techniek ontwikkeld en gestandaardiseerd volgens de IEC 61851. Deze techniek kan worden toegepast voor opportunity charging en overnight charging.



Figuur 18: Voorbeelden van toepassingen van het Oppcharge pantograafstelsel [15]

Batterijbus uitgerust met pantograaf

Deze techniek bestaat uit een voertuig met pantograaf, waarbij de pantograaf contact maakt met een contactpunt op de laadpaal. Er zijn varianten waarbij de pantograaf bovenop het voertuig gemonteerd is, maar er zijn ook varianten waarbij een pantograaf aan de onderkant van het voertuig gemonteerd is. Een pantograaf op een batterijbus maakt het mogelijk om de batterijbus te voeden vanuit een (partieel-)bovenleidingsstelsel. Hiermee kan de bus geladen worden tijdens het rijden, op de locatie waar er een bovenleiding is.



Figuur 19: Voorbeeld van laadsysteem met pantograaf op voertuig [13]

Combinatie van laadpaal en kabel

Bij deze techniek wordt er door middel van een kabel-stekkerverbinding opgeladen. Laadsystemen op basis van dit principe kunnen een vermogen leveren tussen de 25 – 150 kW [16]. Deze techniek is in het kader van batterijbussen enkel interessant voor overnight charging omdat bij deze methode handmatig een stekker in het voertuig gestoken moeten worden.



Figuur 20: Heliox 2x30 kW CCS charger in Luxemburg [16]

3.3.2.2 Inductief laden

Bij inductief laden wordt er energie overgedragen door middel van elektromagnetische velden en is er geen fysiek contact tussen het laadstation en het voertuig. Inductief laden wordt al toegepast in diverse batterijbus-projecten in combinatie met opportunity charging. De techniek kan ook toegepast worden met overnight charging en in-motion charging. Met de huidige stand van de techniek is het mogelijk om 200 kW draadloos over te dragen in stilstand [17]. In motion charging is technisch mogelijk echter er zijn geen overtuigende referentieprojecten gevonden waarbij dit concept grootschalig is toegepast.



Figuur 21: Voorbeeld van inductief laadsysteem [17]

3.3.3 'State of the art' batterijbussen

In Bijlage C wordt een uitsnede van het overzicht uit [8] getoond. De grootte van de batterijen in de batterijbussen varieert tussen de 19 en 660 kWh en de actieradius tussen 8,1 en 560 km. Het energieverbruik per kilometer varieert tussen de circa 0,5 en 2,35 kWh/km waarbij de lengte van de bus (en daarmee gerelateerde gewichtstoename) als voornaamste verklaring voor deze variatie wordt gezien.

3.3.4 Verwachtingen 2020 – 2035 en voorbij

Voor elektrische bussen zijn er in de toekomst de grootste ontwikkelingen te verwachten op het gebied van batterijtechniek en laad-infrastructuur. Zie hoofdstuk 3.1 voor de ontwikkelingen op batterijtechniek.

Op het gebied van laadinfrastructuur is de verwachting dat technologische ontwikkelingen, schaalvergroting en verdere standaardisatie van laadstations de kostprijs voor de laadinfrastructuur zullen verlagen.

4 Analyse naar ombouw bestaande trein

In dit hoofdstuk wordt onderzocht hoe de bestaande trein (GTW) kan worden aangepast op basis van de informatie uit Hoofdstuk 3. De GTW dient als basis voor de referentietrein waarmee alle verdere energie analyses worden uitgevoerd. Het doel is om de huidige karakteristieken van de GTW, zoals acceleratie en capaciteit, gelijk te houden. Uitgangspunten binnen dit hoofdstuk:

- Concept-ontwerp van benodigde aanpassing om van de GTW een emissieloze trein te maken;
- Beschrijving met inschatting van voertuig karakteristieken;
- De resterende technische levensduur na ombouw is nog 15 jaar.

4.1 Technische haalbaarheid

De GTW bestaat uit een twee- of drietal rijtuigen met in het midden een powermodule. Voor een eventuele ombouw naar een trein zonder uitstoot is het mogelijk om de dieselgeneratoren, en dieseltank te verwijderen en de vrijgekomen ruimte in de powermodule, op en onder de rijtuigen te benutten voor alternatieve energiebronnen zoals batterijen, supercaps⁵ en/of een brandstofcel met waterstoftanks. Belangrijke factoren die daarbij spelen zijn het ruimtebeslag, gewicht en, afhankelijk van de componenten, gewenste temperaturen. De volgende uitgangspunten zijn hierbij gebruikt:

- Het temperatuurbereik van het batterijpakket en de bijkomende klimaatapparatuur valt binnen de waarden van de datasheet;
- Er is voldoende ruimte in, op en onder de trein voor het batterijpakket;
- Het gewicht van het batterijpakket is meegenomen in de treinweerstand voor de energieberekeningen van de trein;
- Er is geen rekening gehouden met het verbruik van randapparatuur zoals inverters en energie-managementapparatuur. Dit zijn echter niet significante gebruikers ten opzichte van het voorziene maximale hulpverbruik van de trein (zoals klimaatsysteem);
- De spanning van de batterij wordt gekozen op een niveau dat compatibel is met de werkspanning van de motoren (tussen de 510 en 810 Vdc).

Gewicht

Over het algemeen genomen zijn dieseltreinen zwaarder dan hetzelfde treintype elektrisch uitgevoerd. Het verwijderen van de dieselmotoren, de dieseltank en generatoren van de GTW zal een gewichtsbesparing opleveren die ingezet wordt om de benodigde elektrische componenten te kunnen realiseren (onder andere pantografen, omzetters, aansluiting batterijen, extra vermogenslektronica).

Er zijn twee beperkende factoren voor het gewicht. De maximale last waar de trein op ontworpen is en de maximale aslast die is toegestaan op de baanvakken. In de huidige situatie wordt volgens de netverklaring uitgegaan van 21 ton aslast voor de lijnen in Groningen en Fryslân.

Vanuit het treinontwerp geldt voor de GTW 2/6 (2 rijtuigen) geldt een maximale aslast van 21 ton voor de middelste aangedreven assen en een maximum van 13 ton per as voor de assen in de draaistellen aan voor- en achterzijde. De GTW 2/8 (3 rijtuigen) heeft nog een draaistel in een tussenwagon waarvoor een maximale aslast van 15 ton geldt.

Met deze gegevens komen we op de volgende maxima:

GTW 2/6	Voor [ton]	Aandrijving [ton]	Achter [ton]	Som [ton]
Max. aslast	13,000	21,000	13,000	
Hoogste belading	11,297	19,662	11,107	
Beschikbaar per as	1,703	1,338	1,893	

⁵ Supercaps zijn in het onderzoek niet verder meegenomen. Reden is dat met de hoge C-rate de batterijen voldoende snel opgeladen kunnen worden. Daarnaast zijn de supercaps relatief groot waardoor kostbare ruimte verloren zou gaan.

Totaal beschikbaar	3,406	2,676	3,786	9,868
---------------------------	-------	-------	-------	--------------

Tabel 7: Gewichten GTW 2/6

GTW 2/8	Voor	Aandrijving	Tussenwagon	Eindwagon	Totaal
Max. aslast	13 ton	21 ton	15 ton	13 ton	
Hoogste belading	11.531 kg	19.098	13.889	12.282	
Beschikbaar per as	1.469	1.902	1111	718	
Totaal beschikbaar	2.938	3.804	2.222	1.436	10.400

Tabel 8: Gewichten GTW 2/8

Treintype	GTW 2 / 6	GTW 2 / 8
Maximaal extra gewicht*	9.868 kg	10.400 kg
Gewicht extra batterijen	7.500 kg	9.750 kg

*exclusief mogelijke gewichtsbesparing

Tabel 9: Gewicht batterijen per GTW

Volgens de EN 15663 is het niet nodig om opnieuw typetesten uit te voeren zo lang de massa van de bak niet meer dan 10% afwijkt t.o.v. het huidige ontwerp. Door de toevoeging van de batterijpakketten zal deze grens echter overschreden worden. Hierdoor zal er een delta analyse uitgevoerd moeten worden tussen de situatie voor en na de ombouw. Dit kan eventueel ook door middel van simulaties, aangezien het toevoegen van gewicht vaak een gunstig effect heeft op loopeigenschappen en veiligheid. Wij verwachten daarom dat het risico dat een omgebouwde trein niet wordt toegelaten op basis van gewichtstoename beperkt is.

Batterijen

Voor de ombouw van de GTW zal gebruik worden gemaakt van lithium batterijen. Voor het gebruik van deze batterijen bestaan inmiddels geharmoniseerde normen. Voor meer informatie over deze normen zie:

- NEN-EN-IEC 62928:2018
"Spoorwegen en soortgelijk geleid vervoer - Rollend materieel - Lithium-iontractiebatterijen voor gebruik in railvoertuigen"
- NEN-EN-IEC 62864-1:2016
"Spoorwegen en soortgelijk geleid vervoer - Rollend materieel - Voedingssystemen met energie-opslag aan boord"

Op basis van het maximale energieverbruik per tracé (zie hoofdstuk 5.4) is er berekend dat er 525 kWh aan capaciteit nodig is voor de GTW 2/6 en 630 kWh voor de GTW 2/8. Door gebruik te maken van LTO-batterijpakketten van LeClanche (zie bijlage A) met een energiedichtheid van 55,56 Wh/kg zijn er qua gewicht geen problemen voor de referentietrein (GTW 2/6). Voor de GTW 2/8 zal met deze energiedichtheid nog te veel gewicht worden toegevoegd. Detail engineering zal nodig zijn om aan de gewichtseisen te voldoen. De eerste inschatting is dat dit mogelijk is, aangezien de energiedichtheid van LTO batterijcellen momenteel richting 80 Wh/kg gaat. Door bijvoorbeeld ook nog lichtgewicht behuizingen te gebruiken kan het gewicht van het totale batterijpakket gereduceerd worden en ook de gewichtsbesparing door het vervangen van de dieselcomponenten helpt hier aan mee, aangezien deze conservatief is.

De batterijen kunnen deels geplaatst worden in de power module. Het resterende deel kan op het dak en onder het voertuig geplaatst worden. Het is tevens mogelijk om de batterijen in het rijtuig zelf onder de stoelen te plaatsen. Onze inschatting is dan ook dat er voldoende ruimte in de trein aanwezig is om de benodigde batterijen mee te kunnen nemen zonder dat dit ten koste gaat van zitplaatsen.

Laadvoorziening

Om deze batterijen te kunnen laden moet er een laadvoorziening gecreëerd worden. Hiervoor zijn meerdere opties beschikbaar. Er kunnen standaard stroomafnemers gebruikt worden, deze hebben als voordeel dat ze vaak al gecertificeerd zijn voor gebruik in het spoor.

Voor de ombouw wordt op dit moment uitgegaan van een stroomafnemer voor een standaard B1 bovenleidingsysteem. Het voordeel hiervan is dat deze gecertificeerd en al verkrijgbaar zijn, echter bij stilstand zijn deze gelimiteerd in de hoeveelheid stroom die ze aan kunnen. Om dit op te lossen moet er bij de laadstations voldoende koper gebruikt worden om de benodigde hoeveelheid stroom veilig te kunnen leveren via de stroomafnemer.

Er kan ook voor een andere oplossing gekozen worden, bijvoorbeeld een specifieke stroomafnemer ontworpen om in korte tijd heel veel stroom aan te kunnen of een stroomafnemer zoals die ook gebruikt worden voor elektrische bussen. We raden aan om de keuze hiervoor af te stemmen met de fabrikant en/of systeem integrator die deze laders uiteindelijk zal moeten plaatsen.

Waterstof

In de power module van de GTW is ruimte om PEM-brandstofcellen (Proton Exchange Membrane) te plaatsen in combinatie met composiet-waterstoftanks op het dak van de rijtuigen en batterijen en of supercaps in de powermodule. De brandstofcellen kunnen dan de batterijen tijdens de rit of tijdens stilstand op peil houden terwijl de batterijen of supercaps de piekvermogens bij het accelereren en remmen voor hun rekening nemen. Ten opzichte van een trein met alleen batterijen is het mogelijk om de benodigde batterijcapaciteit te beperken en/of de noodzaak om gedurende de dag bij te laden. Stadler is momenteel een GTW op waterstof aan het ontwikkelen met het ombouwen van de huidige treinstellen van Arriva als uitgangspunt.

4.2 Mogelijkheden ombouw per 2025

Om in 2025 te komen tot een emissieloos treinverkeer moet op korte termijn een plan worden opgezet om of nieuwe treinen bij te bestellen of om de bestaande vloot GTW treinstellen en de nieuwe WINK treinstellen om te bouwen. De oudste GTW-treinstellen dateren van 2006 en kennen naar verwachting een levensduur van 30 jaar. Brandstofcellen kennen doorgaans een levensduur van 15 jaar en batterijen afhankelijk van het gebruik enkele jaren tot 15 jaar, afhankelijk van het gebruik. Ombouw van de GTW treinstellen is daardoor een duurzaam alternatief. In Hoofdstuk 7 wordt inzicht gegeven in de uitrolplanning op basis van Partiële bovenleiding, of Waterstof.

4.3 Mogelijkheden ombouw 2035

In de concessie tot 2035 is geen overnameverplichting opgenomen voor treinen die niet al Zero emissie zijn en rijden tijdens de concessie. Derhalve kan in 2035 met een 'schone lei' qua materieel worden gekozen. Een doorkijk op de bestaande markt geeft ontwikkelingen bij meerdere leveranciers richting emissieloze treinen alsmede ontwikkelingen op het gebied van waterstof, batterijen en laadinfrastructuur. De verwachting is dat het aanbod stijgt en de prijzen van deze treinen gaan dalen richting het niveau van diesel- en elektrische treinen.

5 Bepaling van het energiegebruik

Om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden is het van belang te weten wat het verbruik van de treinen is op de verschillende trajecten in de Provincies Fryslân en Groningen. In dit hoofdstuk wordt er uitgegaan van de in Hoofdstuk 4 beschreven referentietrein.

Hiervoor wordt gebruik gemaakt van analysepakketten en modellen. Er is een advies gedaan voor een trein die volledig functioneert met batterijen en opportunity charging in combinatie met Partiële bovenleiding of Waterstof. De Partiële bovenleiding is uitgevoerd door Ricardo en het deel van de waterstoftrein is uitgevoerd door Arcadis.

Om ervoor te zorgen dat de uitgangspunten met elkaar overeen komen zijn de berekeningen van Arcadis en Ricardo met elkaar vergeleken. In dit hoofdstuk is eerst ingegaan op de vergelijking van de resultaten van beide bedrijven om ervoor te zorgen dat er van hetzelfde werd uitgegaan. Daarna zijn de verbruiken van een referentie trein gegeven wat als start fungeert voor verdere onderzoeken.

5.1 Analysepakketten

Op basis van de referentietrein en de randvoorwaarden en scenario's alsmede de locaties voor opportunity charging hebben zowel Ricardo als Arcadis energieberekeningen uitgevoerd. Beide bedrijven gebruiken een andere analysepakket voor deze berekeningen.

Inherent aan het gebruik van verschillende analysepakketten is dat er delta's zijn. Deze delta's zijn geminimaliseerd door de uitgangspunten te iken, waardoor vergelijkbare resultaten gegenereerd werden. Uit de analyses volgt op welke trajecten een batterijtrein met opportunity charging nog een extra energiebron nodig heeft in de vorm van Partiële bovenleiding, of waterstof.

Referentietrein

Voor de vergelijking van de resultaten uit de beide analysepakketten wordt eerste uitgegaan van een referentietrein. Ricardo en Arcadis hebben samen de gegevens van de referentietrein vastgesteld en is hieronder gegeven (zie ook Hoofdstuk 4):

- Berekeningen worden uitgevoerd met een GTW 2/6 treinstel;
- De totale batterijcapaciteit is 525 kWh voor GTW 2/6. Voor de GTW 2/8 wordt 1,2 keer zoveel batterijcapaciteit toegewezen, dus 630 kWh. De toename in massa in leeggewicht trein ten opzichte van de huidige GTW 2/6 is 7.500 kg bij deze batterijcapaciteit. Zie ook Hoofdstuk 4;
- De trein is maximaal beladen. Dit komt overeen met een belading van 175% ten opzichte van een normaal beladen trein. Dit is een conservatieve benadering temeer ook in de concessie uitvraag is geëist dat elke passagier een zitplaats heeft;
- De treinweerstand is zeer bepalend voor het energieverbruik. Arcadis beschikte over weerstandsgegevens die overeenkwamen met waarden zoals bij Ricardo ook bekend waren. Deze waarden zijn gebruikt;
- In de berekeningen wordt rekening gehouden met een tegenwind van 10 km/u. Hierbij dient opgemerkt te worden dat niet alleen een tegenwind een verhoogde treinweerstand tot gevolg heeft, maar een zijwind heeft minstens evenveel impact op de treinweerstand. Opmerking: Om echt de worst case trein te nemen zou een hardere tegenwind mee moeten worden genomen. Echter, in combinatie met onder andere een maximaal beladen trein en maximaal gebruik klimaatstelsel kan deze situatie toch als representatief gehouden worden voor worstcase;
- Rekening wordt gehouden met een hulpverbruik van 30 kW en een maximaal klimaatverbruik van 50 kW per reizigersbak (130 kW totaal) in extreme situaties zoals een buitentemperatuur van 20 graden onder nul. Dit komt overeen met ervaringsgetallen van Ricardo en is een worstcase benadering.

5.2 Arcadis Xandra simulatie

Om het energieverbruik van de treinen te bepalen is door Arcadis gebruik gemaakt van de in huis ontwikkelde treinverkeersimulator Xandra. In Xandra zijn de trajecten van de noordelijke regionale lijnen ingevoerd en hierover heeft de referentietrein gereden. De gegevens van deze trein zijn ingevoerd in Xandra en op basis van de voorgestelde dienstregelingen zijn simulaties met de

referentietrein uitgevoerd. Hieruit volgt het energieverbruik van de treinstellen op de trajecten als stoptrein en waar van toepassing ook als sneltrein.

5.3 Ricardo energieberekening

Ricardo berekent het energieverbruik van het materieel op basis van de modellen zoals door Ricardo gebruikt wordt voor de verrekening van het energieverbruik per vervoerder. Deze methodiek wordt sinds eind jaren 90 door Ricardo gebruikt en met eerdere studies is aangetoond dat met deze methodiek voldoende betrouwbaar het energieverbruik te bepalen is.

Een belangrijke parameter is hierbij de inzet. Ricardo rekent met één bepaalde snelheid tussen stations. Op basis van de snelheidsprofielen zoals bij Arcadis bekend is een gemiddelde maximum snelheid bepaald tussen twee stops. In het algemeen blijkt dat deze snelheden te hoog liggen. In de berekeningen leidt dit tot een hoger energieverbruik dan in de praktijk gerealiseerd wordt. Dit levert een marge op in de uitkomsten.

Vergelijking

Nagegaan is of beide rekenprogramma's dezelfde uitkomsten opleverden. Daarvoor zijn de uitkomsten voor het traject Groningen-Leeuwarden met elkaar vergeleken. De gevonden verschillen zijn verklaard en op basis daarvan zijn de gemeenschappelijke uitgangspunten geformuleerd.

5.4 Energievraag per tracé

Berekend zijn de energieverbruiken op de ritten tussen de eindstations. In Tabel 10 en Tabel 11 zijn deze verbruiken per tracé weergegeven. Onderscheid wordt hierbij gemaakt tussen drie scenario's:

- Worst case, volle belading 175% en 130 kW hulp vermogen;
- Normaal, belading 8 ton aan reizigers en 130 kW hulp vermogen;
- Licht gewicht, belading 8 ton aan reizigers en 65 kW hulp vermogen.

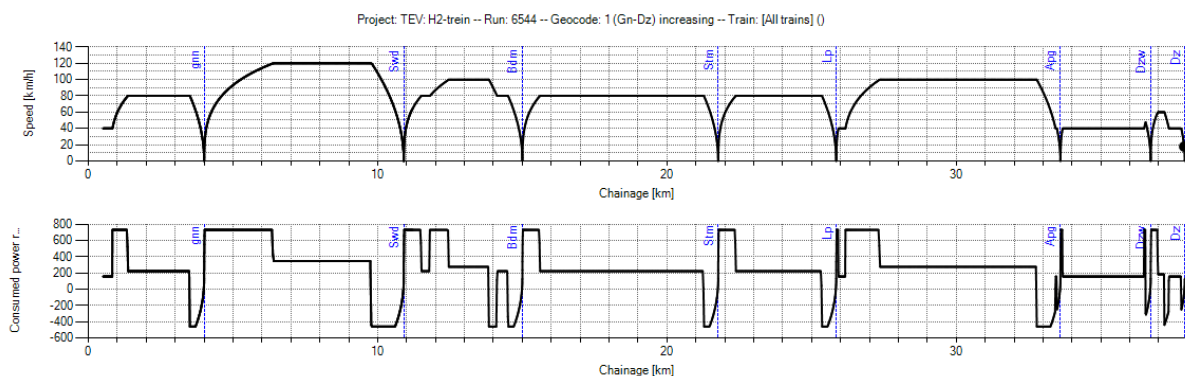
Traject	Worst case [kWh]	Normaal [kWh]	Licht gewicht [kWh]	Afstand [km]
Leeuwarden – Stavoren	221	183,67	131,65	49,9
Stavoren – Leeuwarden	218	183,67	131,65	49,9
Leeuwarden – Harlingen Haven	120	97,08	68,90	26,3
Harlingen Haven – Leeuwarden	124	98,08	68,49	26,3
Sneek – Leeuwarden	91	73,00	51,89	21,4
Leeuwarden – Sneek	82	73,00	51,89	21,4
Groningen – Veendam	119	103,60	74,58	28,9
Veendam – Groningen	124	104,66	75,39	28,9
Groningen – Delfzijl	179	142,08	98,48	37,9
Delfzijl – Groningen	181	145,08	104,13	37,9
Groningen – Eemshaven	208	169,33	114,99	45,1
Eemshaven – Groningen	209	169,33	114,39	45,1
Roodeschool – Groningen	182	145,33	97,88	37,7
Groningen – Roodeschool	179	145,33	98,64	37,7
Winschoten – Groningen	201	187,75	139,43	46,3
Nieuweschans – Groningen	190	184,50	139,65	46,3
Leer – Groningen	331	275,75	207,73	72,1
Groningen – Leer	330	279,00	206,25	72,1
Winschoten – Groningen	151	138,92	107,39	34,1
Groningen – Winschoten	158	127,00	93,09	34,1
Groningen – Winschoten Sneltrain	131	109,19	81,57	34,1
Winschoten – Groningen Sneltrain	125	116,56	92,98	34,1
Leeuwarden – Groningen Europapark	277	224,42	171,60	55,6
Zuidhorn – Groningen Europapark	62	48,08	32,68	13,4
Groningen Europapark – Zuidhorn	60	49,25	33,23	13,4
Leeuwarden – Groningen	263	211,00	164,31	54,1
Groningen Europapark – Leeuwarden	277	228,75	173,50	55,6
Leeuwarden – Groningen Europapark Sneltrain	228	195,72	156,09	55,6
Groningen Europapark – Leeuwarden Sneltrain	232	200,06	158,46	55,6
Nieuweschans – Leer	129	91,08	66,65	25,8
Leer – Nieuweschans	142	89,08	65,90	25,8

Tabel 10: Overzicht energiegebruik per tracé in kilogram

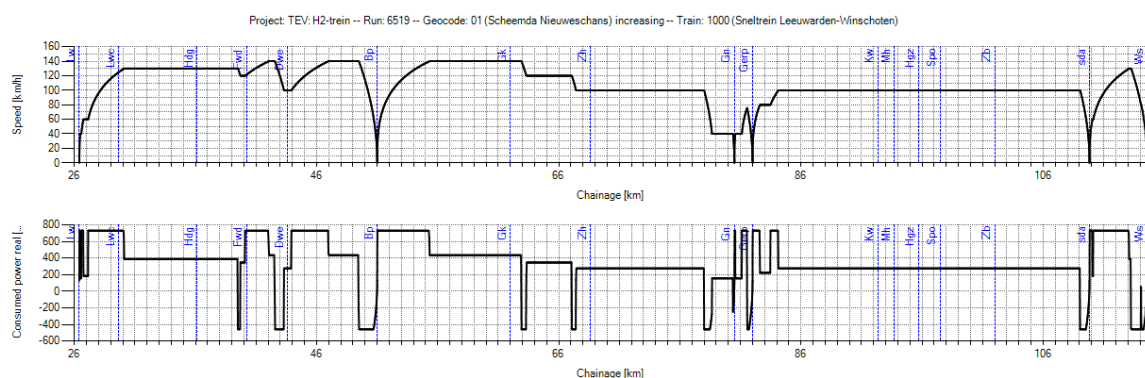
Traject	Worst case [kg]	Normaal [kg]	Licht gewicht [kg]	Afstand [km]
Leeuwarden – Stavoren	14,1	11,7	8,4	49,9
Stavoren – Leeuwarden	13,9	11,7	8,4	49,9
Leeuwarden – Harlingen Haven	7,6	6,2	4,4	26,3
Harlingen Haven – Leeuwarden	7,9	6,2	4,4	26,3
Sneek – Leeuwarden	5,8	4,6	3,3	21,4
Leeuwarden – Sneek	5,2	4,6	3,3	21,4
Groningen – Veendam	7,6	6,6	4,7	28,9
Veendam – Groningen	7,9	6,7	4,8	28,9
Groningen – Delfzijl	11,4	9,0	6,3	37,9
Delfzijl – Groningen	11,5	9,2	6,6	37,9
Groningen – Eemshaven	13,2	10,8	7,3	45,1
Eemshaven – Groningen	13,3	10,8	7,3	45,1
Roodeschool – Groningen	11,6	9,2	6,2	37,7
Groningen – Roodeschool	11,4	9,2	6,3	37,7
Winschoten – Groningen	12,8	11,9	8,9	46,3
Nieuweschans – Groningen	12,1	11,7	8,9	46,3
Leer – Groningen	21,1	17,5	13,2	72,1
Groningen – Leer	21,0	17,8	13,1	72,1
Winschoten – Groningen	9,6	8,8	6,8	34,1
Groningen – Winschoten	10,1	8,1	5,9	34,1
Groningen – Winschoten Sneltrain	8,3	6,9	5,2	34,1
Winschoten – Groningen Sneltrain	8,0	7,4	5,9	34,1
Leeuwarden – Groningen Europapark	17,6	14,3	10,9	55,6
Zuidhorn – Groningen Europapark	3,9	3,1	2,1	13,4
Groningen Europapark – Zuidhorn	3,8	3,1	2,1	13,4
Leeuwarden – Groningen	16,7	13,4	10,5	54,1
Groningen Europapark – Leeuwarden	17,6	14,6	11,0	55,6
Leeuwarden – Groningen Europapark Sneltrain	14,5	12,5	9,9	55,6
Groningen Europapark – Leeuwarden Sneltrain	14,8	12,7	10,1	55,6
Nieuweschans – Leer	8,2	5,8	4,2	25,8
Leer – Nieuweschans	9,0	5,7	4,2	25,8

Tabel 11: Overzicht energiegebruik per tracé in kilo`s waterstof

Ter indicatie zijn hieronder het snelheidsprofiel en energieverbruik weergegeven van Groningen – Delfzijl als stoptrein en Leeuwarden – Winschoten als sneltrain. De stoptrein kent een lagere snelheid, een kleinere halte- en totale afstand. De sneltrain rijdt met een hogere snelheid en kent weinig stops over een aanzienlijk langer tracé.



Figuur 22: Groningen – Delfzijl, snelheidsprofiel (boven) versus vermogen (onder)



Figuur 23: Leeuwarden – Winschoten, snelheidsprofiel (boven) versus vermogen (onder)

6 Haalbaarheid energiescenario's

Nu er in hoofdstuk 5 bepaald is hoeveel energie er verbruikt wordt per traject kan er in dit hoofdstuk bepaald worden op welke wijze deze energie aangevuld kan worden. In dit stuk is nagegaan of het haalbaar is de dienstregeling te rijden met een trein met daarin zoveel batterijen als mogelijk gecombineerd met oplaadpunten op de eindhaltes (scenario 1). Op basis van de resultaten van dit scenario is nagegaan waar de knelpunten in het ontwerp zitten en wat daartegen gedaan kan worden (scenario 2 en 3). Daarnaast wordt het toepassen van waterstof beschouwd.

6.1 Uitgangspunten energiescenario's

Om de haalbaarheid van batterijtreinen met opportunity charging te kunnen toetsen, is onderzocht hoeveel batterijpakketten er nodig zijn per traject om de gevraagde dienstregeling te kunnen rijden.

Voor het bepalen van de haalbaarheid zijn er simulaties uitgevoerd waarin het verbruik van een trein op verschillende trajecten in kilowattuur (kWh) is berekend. De resultaten hiervan staan in Hoofdstuk 5 en geven een benodigde capaciteit van 525 kWh voor de GTW 2/6 en 630 kWh voor de GTW 2/8. Daarin is het gewicht van de batterijen in meegenomen. Bij het opladen van de batterijen is uitgegaan van een C-rate van 4C. Dit houdt in dat de batterij in 15 minuten volledig opgeladen kan worden. De C-rate gecombineerd met de capaciteit van de batterij geeft het maximale vermogen waarmee de batterij opgeladen kan worden.

Laadtijden

Op basis van de te rijden dienstregeling is onderzocht wat de omlopen van de treinen zijn en hoeveel keertijd de treinen op de eindpunten hebben. De keerpunten/tijden zijn namelijk de momenten waarop de trein stilstaat en waarbij de batterij zou kunnen worden opgeladen. In Tabel 12 is een overzicht van de keertijden opgenomen.

Station	Keertijden [minuten]
Leeuwarden	15 (Sneek/Stavoren) 11 (Harlingen) 3 (sneltrain Groningen) 12 (stoptrein Groningen)
Harlingen Haven	24 (Leeuwarden)
Sneek	10 (Leeuwarden)
Stavoren	6 (Leeuwarden)
Groningen Hoofdstation	2 à 3 (alle treinen; allen doorgaand, <u>geen</u> keringen)
Groningen Europapark / Keervoorziening	8 (sneltrain Leeuwarden) 5 (stoptrein Leeuwarden) 22 (Zuidhorn, mogelijk kering op keerspoor van circa 20 minuten; 22 minuten is aankomst – vertrek op Europapark)
Veendam	7 (Delfzijl)
Winschoten	18 (Leeuwarden)
Leer	52 (Eemshaven/Roodeschool, tijdens kering wordt trein afgerangeerd om Emslandstrecke niet te blokkeren)
Delfzijl	5 (Veendam)
Roodeschool	21 (Leer)
Nieuwesches	4 (Eemshaven)
Eemshaven	7 (Leer/Nieuwesches)

Tabel 12: Huidige keertijden per station

Uit de tabel blijkt dat de oplaadtijd varieert tussen de minimaal 2 en maximaal 52 minuten. In het merendeel van de gevallen is het volledig opladen van de batterijen in 15 minuten dus niet mogelijk.

Overige uitgangspunten

Voor het doorrekenen van dagelijkse treinomlopen, wordt uitgegaan van de referentietrein zoals gegeven in Hoofdstuk 4 en de energieverbruiken zoals gegeven in Paragraaf 5.4. Daarnaast zijn aanvullend de volgende aannames gedaan:

- Berekeningen worden uitgevoerd met een GTW 2/6 treinstel. De GTW 2/8 is minder kritisch en aangenomen is dat met het aantonen van de haalbaarheid voor GTW 2/6 dit ook haalbaar is voor GTW 2/8;
- De totale batterijcapaciteit is 525 kWh voor GTW 2/6. Voor de GTW 2/8 wordt 1,2 keer zoveel batterijcapaciteit toegewezen, dus 630 kWh;
- Voor de simulaties wordt gerekend met de End of Life (EoL) capaciteit. Deze bedraagt 420kWh voor de GTW 2/6 en 504kWh voor de GTW 2/8;
- De laadpalen op eindstations kunnen laden met 4C. Zie ook Hoofdstuk 3;
- De laadpunten bevinden zich op de posities zoals aangegeven in Tabel 13. Door een te korte stilstand op tussenstations is daar geen laadsysteem voorzien; Een voorbeeld van de laadvoorziening en de daarbij benodigde transformator behuizing is weergegeven in Figuur 24;
- Bij Leeuwarden en Groningen staan meerdere treinen tegelijk stil en worden tegelijk opgeladen. Op deze locaties zijn in deze haalbaarheidsstudie daarom vier oplaadstations voorzien. Bij optimalisatie kan dit mogelijk omlaag en kunnen de kosten gereduceerd worden door juiste afspraken te maken met de energieleverancier (slimme keuzes aansluiting onderstations, laadstrategie etc.). Om dezelfde reden zijn bij Groningen Europapark twee stations geplaatst.

Locatie	Aantal laadstations
<u>Fryslân:</u>	
Leeuwarden	4
Stavoren	1
Harlingen Haven ⁶	1
Sneek ⁶	1
<u>Groningen:</u>	
Groningen hoofdstation	4
Groningen Europapark	2
Veendam	1
Winschoten	1
Leer	1
Delfzijl	1
Roodeschol	1
Eemshaven	1
Nieuweschans	1
Totaal	20⁷
<u>Opstelterrein</u>	
Groningen	bovenleiding (70% van de vloot)
Fryslân	Bovenleiding (30% van de vloot)

Tabel 13: Overzicht laadstations

- Voor het benodigde vermogen voor de oplaadstations wordt uitgegaan van twee gekoppelde (spits) GTW 2/8. Dit komt neer op 5040 kW;
- Trajecten waar tijdens de spits met drie treinstellen gereden wordt hebben een voldoende volle batterij om na ontkoppelen en opladen weer zelfstandig verder te rijden. Bij detailengineering zal dit verder uitgezocht moeten worden;
- Bij de keertijden (Tabel 12) wordt nog een marge van 1 minuut aangehouden voor het "aan-en ontkoppelen" van het oplaadsysteem. Dit is een conservatieve aanname;

⁶ Bij scenario 3 is dit oplaadstation (2x) niet nodig. Voor de kostenberekening wordt uitgegaan van totaal 11 oplaadstations.

⁷ Voor de kostenberekening is uitgegaan van 18 laadstations.

- Bij de start van de dag zijn de batterijen 100% opgeladen. Treinen worden opgeladen op opstelsterrein Groningen (70% van vloot) of Leeuwarden (30% van vloot). Opladen op opstelsterreinen gebeurt via de normale bovenleiding omdat hier langer de tijd is om op te laden gedurende de nacht overstand.

Belangrijk bij de laadposities is de tijd dat er geladen kan worden. Hiervoor houden we de tijden aan zoals gegeven in tabel 2 minus de eerder gegeven margetijd van één minuut.

Op de opstelsterreinen te Groningen en Leeuwarden wordt gebruik gemaakt van een normaal bovenleidingsysteem omdat hier langere tijd stil wordt gestaan en de laadstroom beperkt is.



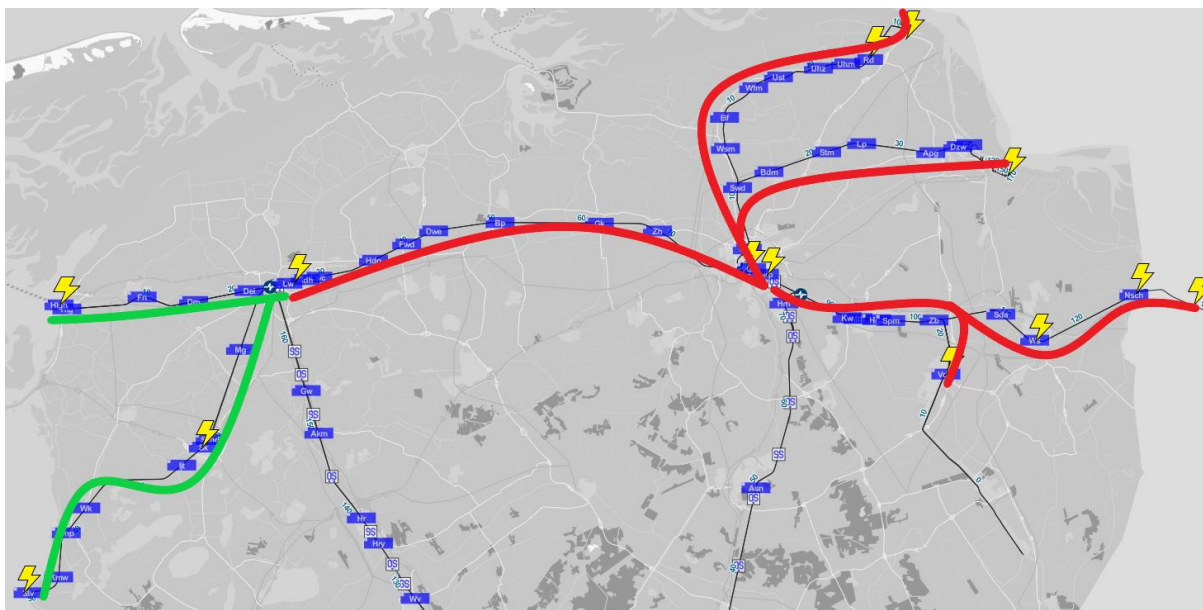
Figuur 24: Transformator met technische ruimte

6.1.1 Scenario 1 – Trein vol met batterijen, geen bovenleiding

De volgende treinenlopen zijn beschouwd:

- Leeuwarden - Stavoren
- Leeuwarden - Sneek
- Leeuwarden - Harlingen haven
- Leeuwarden – Winschoten (waarbij de trein tussen Leeuwarden en Groningen als stoptrein rijdt en tussen Groningen en Winschoten als sneltrein)
- Leeuwarden – Groningen Europapark (met twee slagen door naar Winschoten)
- Eemshaven - Leer (met een slag naar Winschoten in plaats van Leer)
- Delfzijl – Veendam

In deze treinlopen is nagegaan hoe diep de batterij ontladen wordt gedurende een dag. In de volgende tabel zijn de minimum hoeveelheid lading in de batterij gegeven voor verschillende treinlopen (Depth of Discharge – DoD).



Figuur 25: Vergelijking tracés waar gehele dag voldoende geladen kan worden

Traject	DoD	
	[kWh]	[%]
Leeuwarden – Harlingen Haven	296	30
Leeuwarden – Stavoren	115	73
Leeuwarden – Sneek	329	22
Leeuwarden – Winschoten	-38	109
Leeuwarden – Groningen Europapark	-623	248
Delfzijl – Veendam	-858	304
Eemshaven – Leer	-145	135
Leeuwarden – Groningen Europapark (Sneltrain)	-3556	947
Gemiddelde DoD		233

Tabel 14: Overzicht minimumlading

Conclusie scenario 1

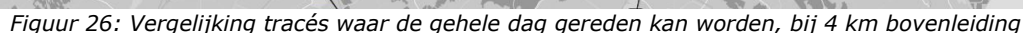
Uit de resultaten concluderen we dat alleen voor de treinenloop tussen Leeuwarden, Stavoren, Sneek en Harlingen haven de trein voldoende op kan laden om gedurende een dag lang te blijven rijden.

6.1.2 Scenario 2 – Batterijtrein met bovenleiding bij Groningen

Voor het doorrekenen van dagelijkse treinenomlopen met toegevoegde bovenleiding wordt gebruik gemaakt van dezelfde uitgangspunten als beschreven in Paragraaf 6.1. Daarnaast wordt gebruik gemaakt van de bovenleiding die nu nog aanwezig is tussen Groningen (Gn) en Groningen Europapark (Gerp), met een doorloop van circa 4 km richting Winschoten (Ws).

Tijdens het rijden is met een voldoende gedimensioneerde stroomafnemer het benodigde vermogen om de batterij met 4C op te laden van de bovenleiding af te nemen. Op de stations waar het materieel stilstaat dient een oplaadlocatie te worden opgenomen en gecombineerd te worden met het bovenleidingsysteem.

In dezelfde treinenlopen als eerder gegeven in Paragraaf 6.1.1 is weer nagegaan wat de minimum lading in de batterij is gedurende een dag. In de volgende tabel zijn de minimum hoeveelheid lading in de batterij gegeven, voor de verschillende treinenlopen.

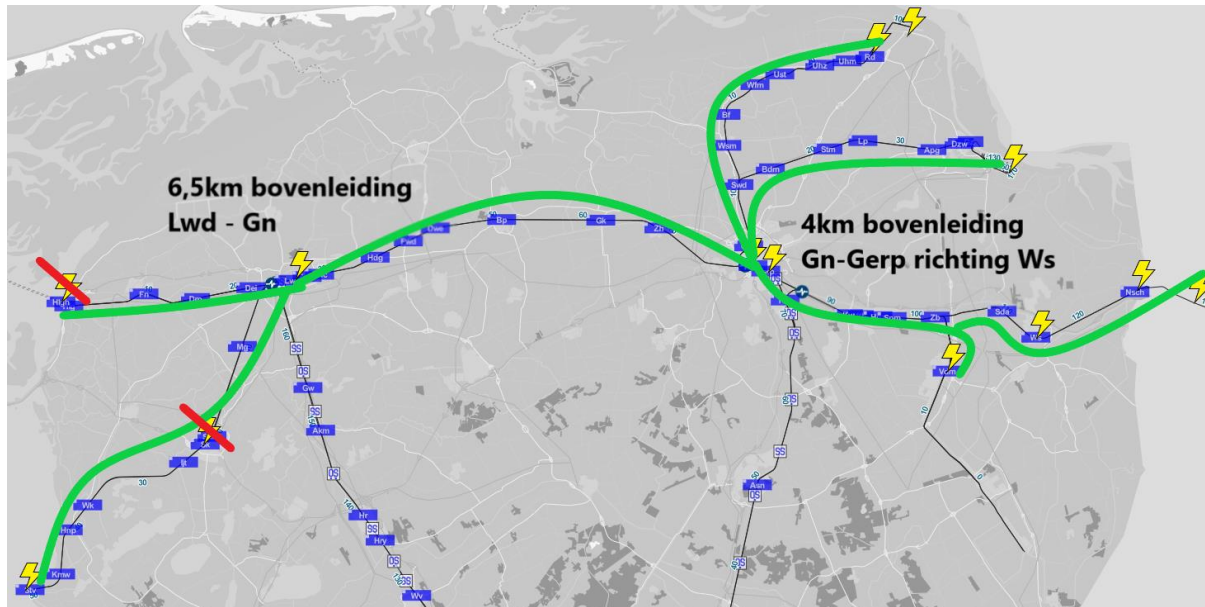


DoD		
Traject	[kWh]	[%]
Leeuwarden – Harlingen Haven	180	57
Leeuwarden – Stavoren	115	73
Leeuwarden – Sneek	252	40
Leeuwarden – Winschoten	157	63
Leeuwarden – Groningen Europapark	95	77
Delfzijl – Veendam	166	60
Eemshaven – Leer	87	79
Leeuwarden – Groningen Europapark (Sneltrain)	-722	272
Gemiddelde DoD		90

Conclusie scenario 2

6.1.3 Scenario 3 –Bovenleiding bij Groningen en Leeuwarden

De resultaten uit Paragraaf 6.1.2 laten zien dat er ondanks de extra laadmomenten bij Groningen er nog niet voldoende is om de sneltrein tussen Leeuwarden (Lwd) en Groningen (Gn) te laten rijden. Doordat de keertijd voor de sneltrein slechts 3 minuten is in Leeuwarden is het niet mogelijk om voldoende bij te laden in een worst case situatie. Een mogelijke oplossing is het plaatsen van 6,5 km bovenleiding vanaf Leeuwarden richting Groningen. Dit levert 4 minuten laadtijd op per enkele reis, waardoor de totale laadtijd nabij station Leeuwarden 11 minuten wordt in plaats van 3.



Figuur 27: Vergelijking tracés waar de gehele dag gereden kan worden, bij 4 + 6,5 km bovenleiding

De resultaten van de uitgevoerde berekeningen zijn gegeven in onderstaande tabel.

DoD		
Traject	[kWh]	[%]
Leeuwarden – Harlingen Haven	180	57
Leeuwarden – Stavoren	115	73
Leeuwarden – Sneek	252	40
Leeuwarden – Winschoten	157	63
Leeuwarden – Groningen Europapark	116	72
Delfzijl – Veendam	166	60
Eemshaven – Leer	87	79
Leeuwarden – Groningen Europapark (Sneltrain)	129	69
Gemiddelde DoD		64

Tabel 16: Overzicht minimale batterijlading

Conclusie scenario 3

Deze resultaten geven aan dat met deze constructie de batterijen gedurende de treinenloop voldoende kunnen worden geladen zodat de treinen een dag lang ingezet kunnen worden.

Een verdere optimalisatie is dat ook de oplaadstations bij Sneek en Harlingen Haven niet meer nodig zijn (was ook al duidelijk bij andere scenario's gezien de DoD).

6.2 Optimalisatie

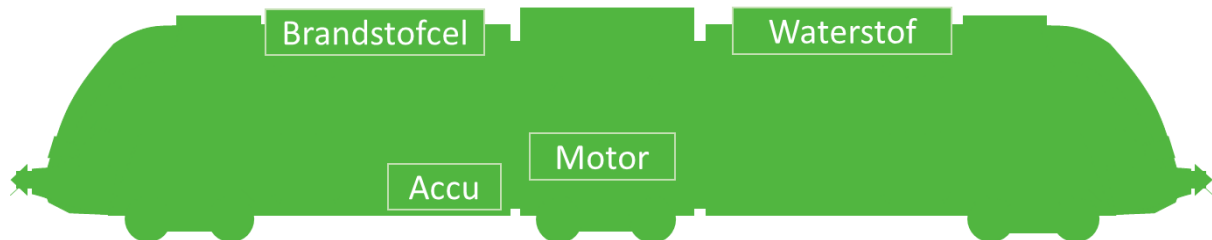
Het is raadzaam om in het detailontwerp een kostenoptimalisatie uit te voeren. Dit zou kunnen door een aantal laadpunten te reduceren in vermogen of juist helemaal weg te laten. Ook het aanpassen van de dienstregeling om zodoende meer laadtijd te creëren op de eindstations is een mogelijkheid.

6.3 Waterstof

Naast bovenleiding is waterstof een alternatief om het bereik van de treinen te vergroten. Zoals beschreven in Paragraaf 2.2.1.2 en 2.2.1.3 is een waterstoffrein technisch een batterijtrein die, voorzien van een brandstofcel en waterstoftanks, een vergroot bereik heeft. De brandstofcel maakt het mogelijk om de batterij niet alleen tijdens het remmen, maar ook tijdens stilstand of rijden op lagere snelheid bij te laden.

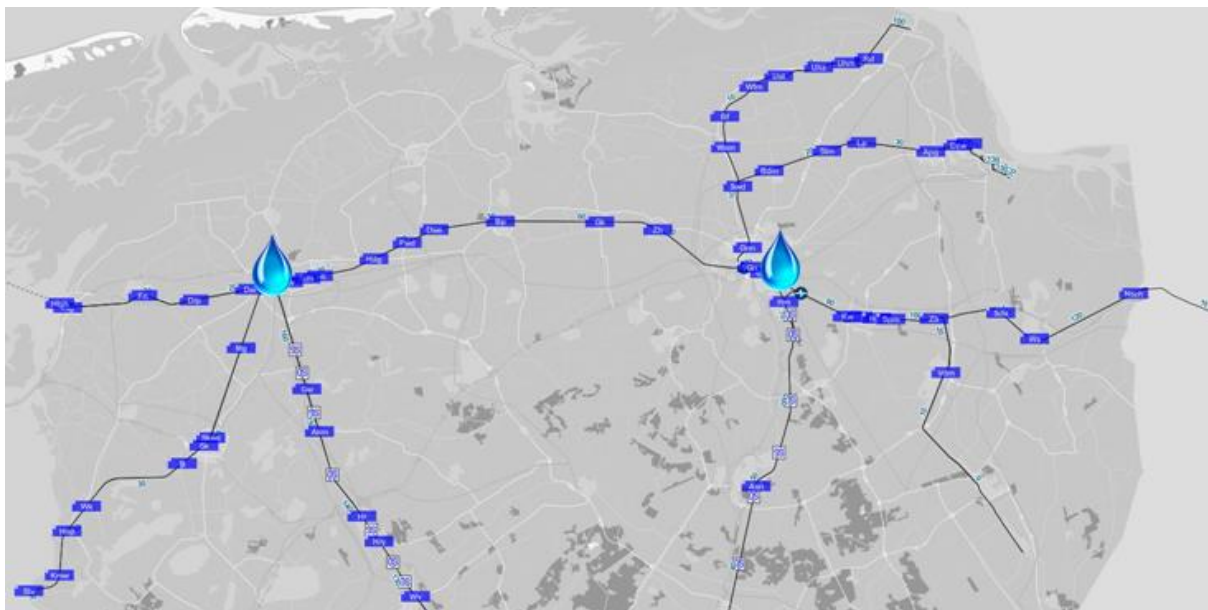
Voor deze studie is voor de waterstofbatterijtrein zonder opportunity charging uitgegaan van een vergelijkbare configuratie van de installaties als de iLint van Alstom en de om te bouwen treinen in het Verenigd Koninkrijk;

- Brandstofcellen met een vermogen van 400 kW
- Maximaal 180 kg aan waterstofcapaciteit in de tanks
- Batterijen met een vermogen van 450 kW
- Batterijcapaciteit van 400 kWh



Figuur 28: Concept Waterstofrein

Uit de berekeningen volgt, conform dezelfde uitgangspunten als voor de batterijtrein uit Paragraaf 6.1.1, een worst-case verbruik van 3,8 tot 21,1 kg waterstof per rit conform Tabel 12. De trein met het grootste energieverbruik gedurende de treindienst, de sneltrein Leeuwarden – Groningen Europapark, heeft daarbij na 9 uur dienst (6 ritten heen en terug) 180 kg verbruikt onder die worst-case omstandigheden en dient dan te gaan tanken.



Figuur 29: Voorgestelde waterstoftanklocaties bij waterstoftreinen zonder Opportunity Charging

Traject	Verbruik [kg]
Leeuwarden – Harlingen Haven	7,6
Leeuwarden – Stavoren	14,1
Leeuwarden – Sneek	5,2
Leeuwarden – Winschoten	25,1
Leeuwarden – Groningen Europapark	17,6
Delfzijl – Veendam	19,1
Eemshaven – Leer	34,3
Leeuwarden – Groningen Europapark (Sneltrain)	14,5

Tabel 17: Overzicht verbruik waterstof per traject

6.3.1 Verdere optimalisatie waterstofrein zonder opportunity charging

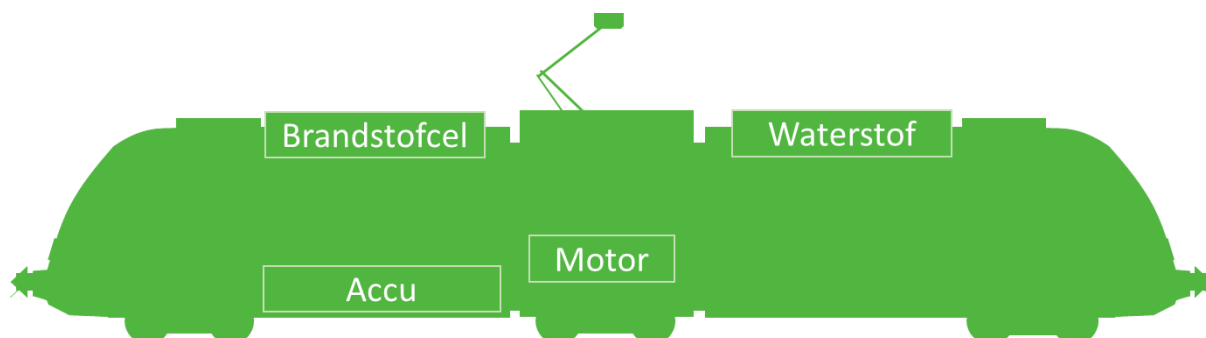
Op basis van de aangeleverde dienstregeling met veelal krappe keertijden zijn treinen veel aan het rijden met een hoog energieverbruik als gevolg. Voor een deel van de treindiensten houdt dit in dat ergens gedurende de dag de trein getankt dient worden. Logistiek is dit eventueel op te lossen door uitwisselen van materieel; zoals spits-versterking of voor onderhoud/reiniging. Daarnaast is er de mogelijkheid om de waterstofrein anders te dimensioneren en geschikt te maken voor opportunity charging.

6.3.2 Waterstofrein met opportunity charging

Opportunity Charging bij een waterstofrein of andersom bij een batterijrein met opportunity charging een brandstofcel en waterstoftanks opnemen als range-extender vraagt een vergelijkbare configuratie als een normale batterijwaterstofrein met uitgebreide batterijcapaciteit. De samenwerking tussen brandstofcel en de batterij als gezamenlijke krachtbron als communicerende vaten dient voor efficiënt gebruik behouden te blijven. Brandstofcellen opereren optimaal met een constante stroomafname: Overproductie dient in de batterij te worden opgenomen. Opportunity charging is een mogelijkheid, omdat dit gebeurt bij stilstand. Opportunity charging gebeurt echter meestal na een remming (waardoor er al remenergie is opgeslagen) wat zou kunnen zorgen voor overcapaciteit. Opportunity charging toevoegen vraagt daardoor om een grotere batterijcapaciteit en/of om een beperktere capaciteit van de brandstofcel. Ook kan de brandstofcel kleiner gedimensioneerd worden of op een kleiner vermogen draaien. Variatie in vermogen is bij hedendaagse brandstofcellen beter mogelijk met kleinere verschillen in de efficiëntie. Een lagere capaciteit van de brandstofcel beperkt de acceleratie van de trein na frequente stops zonder opportunity charging. Een ander nadeel is dat, ondanks het lagere verbruik van waterstof, er zowel faciliteiten voor waterstof als voor opportunity charging dienen te worden aangelegd.

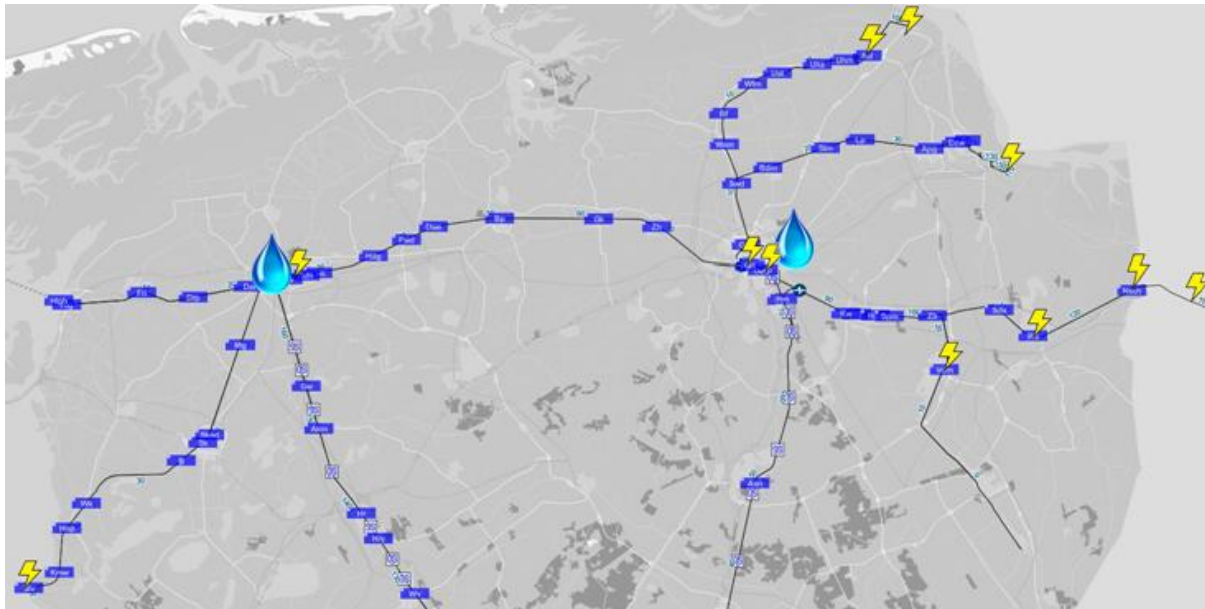
Voor deze studie is voor de waterstofbatterijrein met opportunity charging uitgegaan van een aangepaste configuratie als voor de waterstofbatterijrein zonder opportunity charging;

- Brandstofcellen met een vermogen van 200 kW
- Maximaal 180 kg aan waterstofcapaciteit in de tanks
- Batterijen met een vermogen van 6.750 kW
- Batterijcapaciteit van 600 kWh



Figuur 30: Concept Waterstofrein met opportunity charging

Naast de trein is er infrastructuur nodig om waterstof te kunnen tanken en voor opportunity charging. Aangezien Groningen en Leeuwarden de uitvalsbasis zijn voor de treindienst is het een logische keuze daar waterstoftankstations realiseren. Daarnaast worden voor opportunity charging dezelfde locaties gehanteerd als voor de batterijtrein met opportunity charging. Ten opzichte van de waterstoffrein en de batterijtrein met opportunity charging zijn de tankstations en de laadpunten voorzien van een kleinere capaciteit. Voor de waterstoftankstations wordt uitgegaan van een capaciteit van totaal 8.000 kg waterstof per dag en voor de opportunity charging van 600 kW laadinstallaties.



Figuur 31: Voorgestelde waterstoftank- en opportunity charging locaties bij waterstoffreinen met Opportunity Charging

7 Range-extendors

In dit hoofdstuk worden de technische en financiële haalbaarheid inclusief range-extendors verder onderzocht op basis van de stand van de techniek uit Hoofdstuk 3, het treinontwerp uit Hoofdstuk 4 en het energieverbruik en energienscenario's uit Hoofdstuk 5 en 6. De analyse is ingedeeld per range-extender: Partiële bovenleiding (7.1), Waterstof (7.2) en Methanol (7.3).

7.1 Partiële bovenleiding

Partiële bovenleiding is een beproefde techniek. Daarom wordt er slechts kort ingegaan op de definitie (7.1.1) en de technische haalbaarheid (7.1.2). Vervolgens wordt er ingegaan op de kosten (7.1.3) en de uitrolplanning (7.1.4).

7.1.1 Definitie Partiële bovenleiding

De aanvullende energievoorziening die nodig is naast de opportunity charging stations kan worden gerealiseerd met zogenaamde 'partiële bovenleiding'. Daarmee wordt bedoeld dat op een beperkt gedeelte van een traject bovenleiding wordt gerealiseerd waarmee rijdend en bij stilstand op stations de batterij kan worden opgeladen. In de studie is uitgegaan van standaard bovenleiding type B1, 1.500 V.

7.1.2 Technische haalbaarheid

In tegenstelling tot waterstof en methanol is het gebruik van bovenleiding een beproefde techniek en wordt al decennialang toegepast.

7.1.3 Kosten

Voor het bepalen van de kosten is er onderscheid gemaakt in de posten investeringskosten infrastructuur, onderhoudskosten infrastructuur, investeringskosten materieel en onderhoudskosten materieel. Daarnaast is een post opgenomen voor de energiekosten. Uitgangspunt is dat de energie wordt opgewekt met behulp van windmolens.

Kosten investering infrastructuur

Per baanvak is een schetsontwerp gemaakt. Uitgangspunt van het schetsontwerp is dat het ontwerp voldoet aan de nieuwste eisen van ProRail: het vigerende ontwerpvoorschrift ten aanzien van elektrificatie met 1.500 V. Het schetsontwerp gaat van de volgende uitgangspunten uit (zie ook hoofdstuk 2):

- De baanvakken worden voorzien van een door ProRail gespecificeerd "B1-bovenleidingsysteem" met draagconstructie, geschikt voor snelheden tot 140 km/u;
- Er wordt aangenomen dat afstand tot een onderstation 1 km is; Dit is een conservatieve aanname;
- Uitgangspunt voor de ombouw is dat deze in de nachtelijke uren, tussen 21:00 en 5:00 uur, plaatsvindt, waarbij het spoor van 20:00 tot 6:00 uur buiten exploitatie is gesteld. De kosten voor vervangend vervoer tijdens buitendienststellingen zijn in de raming meegenomen;
- Op de opstel terreinen van Leeuwarden en Groningen wordt bovenleiding aangelegd voor het 's nachts opladen. Hierbij is een totale lengte aangenomen van het aantal treinen vermenigvuldigd met 75 m. Dus $72 \times 75 = 5400$ m.

Voor het elektrificeren zijn bouwkosten in de raming opgenomen. De volgende kosten zijn expliciet vermeld:

- Aanbrengen van de bovenleiding op de opstel terreinen voor 's nacht laden en bovenleiding bij Leeuwarden en Groningen voor rijdend opladen – 700 €/m;
- Twee nieuw te realiseren 1.500 V onderstations op de opstel terreinen – 1.000.000 €/st;
- 17 stuks Opportunity Charging stations van 5 MW – 1.100.000 €/st;
- 1 Opportunity Charging station van 3.8 MW – 1.100.000 €/st;
- Aanbrengen van de 10 kV kabels en glasvezelkabel naar de onderstations 150 €/m.

Bij de bouwkosten horen ook nog *indirecte kosten*. Deze bouwkosten zijn de som van de eenmalige kosten, bouwplaatskosten, uitvoeringskosten, algemene kosten en winst & risico. ProRail hanteert

voor de indirecte bouwkosten drie aanvullende posten boven op de standaard posten, namelijk coördinatiekosten, relatie hoofdaannemer versus onderaannemers en de inschrijfvergoeding voor verliezende inschrijvers. In de raming is voor de indirecte bouwkosten een percentage opgenomen van 30%. Waarvan 15% Engineeringskosten en 15% nader te detailleren.

Daarnaast komen er nog overige kosten bij zoals vervangend vervoer en leges. De aanname hiervoor is 3.500.000 €.

Dit alles brengt een investering van ongeveer € 47 miljoen aan infrastructuur (€ 25,9 miljoen oplaadstations, € 17,6 miljoen bovenleiding).

Uit bijlage G blijkt dat bij toepassing van NCM batterijen er minder oplaadstations nodig zijn. De totaalkosten voor oplaadstations zijn dan € 21,7 miljoen in plaats van € 25,9 miljoen.

Onderhoud infrastructuur

Onderhoud aan de infrastructuur betreft het onderhoud en inspecties aan de oplaadstations, onderstations en bovenleiding. Op basis van kentallen kan gesteld worden dat onderhoud aan 18 oplaadstations ongeveer € 90.000,- per jaar kost.

Onderhoudskosten aan de bovenleiding en de 1.500 V onderstations zijn met name inspectie, preventief onderhoud en vervanging onderdelen. De gemiddelde jaarlijkse kosten zijn € 25 per meter bovenleiding.

Kosten investering Materieel

De kosten voor materieel bestaan uit de kosten van de LTO batterijen (géén vervanging noodzakelijk), ombouwkosten en toelatingskosten. Op basis van het treinontwerp (Hoofdstuk 4) komen de kosten op € 57,3 miljoen. Hierbij zijn de uitgangspunten:

Batterijkosten (module)	900 €/kWh
Batterijkosten GTW 2/6 (525 kWh) per trein	€ 472.500
Batterijkosten GTW 2/8 (630 kWh) per trein	€ 567.000
Batterijkosten WINK = GTW 2/6 (525 kWh) per trein	€ 472.500
Vervangen batterijen	€ 0
Ombouw en engineeringkosten per trein	€ 250.000
Toelatingskosten en testen	€ 1.500.000

Tabel 18: Uitgangspunten materieel

Bovenstaande kosten gelden voor LTO batterijen. Uit Bijlage G volgt dat voor NCM batterijen, de kosten € 57,7 miljoen zijn. Een vergelijkbare prijs.

Onderhoud materieel

De jaarlijkse kosten voor onderhoud aan het materieel zijn vergelijkbaar gesteld met de kosten voor dieseltreinen en worden daarom niet als meerkosten opgevoerd.

Totaal kosten

Uit de raming volgen de benodigde investeringen voor het realiseren van een treinsysteem op basis van Zero emissie-Opportunity Charging. Het onderstaande overzicht geeft de benodigde investeringen in infrastructuur, materieel en onderhoudskosten weer.

Totale investeringskosten infrastructuur (oplaadstations)	€ 25.9 miljoen
Totale investeringskosten infrastructuur (bovenleiding)	€ 17,7 miljoen
Totale investeringskosten materieel	€ 57 miljoen
Jaarlijkse kosten materieel per jaar	€ -
Jaarlijkse kosten infrastructuur per jaar	€ 487.500

Tabel 19: Totaal investering en jaarlijkse kosten, zie Bijlage E Kostenraming batterijtrein met bovenleiding

Kosten energieopwekking

Daarnaast zijn er nog de kosten voor de energieopwekking met behulp van windmolens. Uitgangspunt zijn de kentallen voor windmolens zoals gebruikt in de Arcadis studie uit 2016 [18].

- De investeringskosten voor één 3 MW windmolen: € 5,5 miljoen
- Onderhoudskosten: € 150.000 per jaar
- Aantal vollasturen: 2.450 uren per jaar

Het totale energieverbruik van alle trajecten is op jaarbasis 38 GWh. Dit kan opgewekt worden door 5 windmolens van 3 MW. De jaarlijkse onderhoudskosten zijn € 150.000 per windmolen. In de onderstaande tabel zijn de totalen opgenomen.

Totale investeringskosten windmolens 3 MW	€ 27,5 miljoen
Totale jaarlijkse onderhoudskosten windmolen	€ 750.000

Tabel 20 Totale kosten windmolens

7.1.4 Planning uitrol

Voor het realiseren van Zero emissie treinverkeer in de Groningen en Fryslân zullen verschillende stappen doorlopen moeten worden:

- Vaststellen systeemkeuze (door provincie Groningen/Fryslân in overleg met Nationale overheid)
- Aanbesteden, gunnen en realiseren infrastructuur (door ProRail)
- Aanbesteden, gunnen ombouw/nieuwbouw treinstellen (door concessieverlener/-houder)

Voordat er een aanbesteding kan komen voor de aanpassingen aan de huidige spoorweginfrastructuur of voor de aanschaf van Zero emissie treinen, zullen er eerst systeemkeuzes gemaakt moeten worden. Immers de batterijcapaciteit hangt mede af van de afstand die zonder bovenleiding moet worden overbruggt. Hoe meer bovenleiding hoe minder batterijvermogen noodzakelijk is. Onderzoek naar verder optimalisatie tussen batterijvermogen en bovenleiding zal per tracé naar verwachting maximaal een half jaar in beslag nemen. Daarna zal nog dekking van de benodigde investeringsmiddelen gezocht moeten worden. Ook dit zal enige tijd in beslag nemen.

Zodra de systeemkeuze is gemaakt en dekking van het benodigde budget er is, kunnen de voorbereidingen beginnen voor de aanbestedingen op basis van de systeemkeuzes.

Voor zowel de infrastructuur als voor de treinen worden 7 stappen doorlopen voordat er sprake is van een commerciële exploitatie met de Zero emissie treinen:

1. Besluitvorming
2. Voorbereiding
3. Aanbesteding en gunning
4. Ontwerp
5. Bouw
6. Testen en vergunningverlening (door ILT)
7. Inbedrijfstelling

Voor de infrastructuur is de globale tijdsduur van de verschillende stappen na vaststelling van de systeemkeuzes, als volgt:

Stap	Doorlooptijd (in maanden)
Besluitvorming ⁸	6
Vorbereiding	6
Aanbesteding en gunning	5
Ontwerp	6
Bouw	9
Testen en vergunningverlening infra (ILT)	6
Inbedrijfstelling	1
Totaal	39

Tabel 21: Stappen en tijdsduur na vaststelling systeemkeuze infra

De inschatting is dat deze werkzaamheden gangbaar zijn in de markt en er voldoende kennis, ervaring en capaciteit is om een betrouwbaar proces te kunnen hebben.

Voor de treinen is de globale doorlooptijd van de verschillende stappen als volgt:

Stap	Doorlooptijd (in maanden)
Besluitvorming ⁸	6
Vorbereiding	6
Aanbesteding en gunning	5
Ontwerp	9
Bouw (afhankelijk van aantal en keuze verbouw/nieuwbouw)	9-24
Testen en vergunningverlening materieel (ILT)	6
Inbedrijfstelling	1
Totaal	42-57

Tabel 22: Stappen en tijdsduur na vaststelling systeemkeuze trein

Afhankelijk van de gekozen systeemkaders (lengte bovenleiding versus batterijcapaciteit) en het gewenste aantal treinen zal de doorlooptijd variëren. De treinen zijn nu nog niet goed verkrijgbaar op de markt. Dus ook bovenstaande doorlooptijden van 'ontwerp' en 'bouw' kunnen langer uitvallen.

7.2 Waterstof

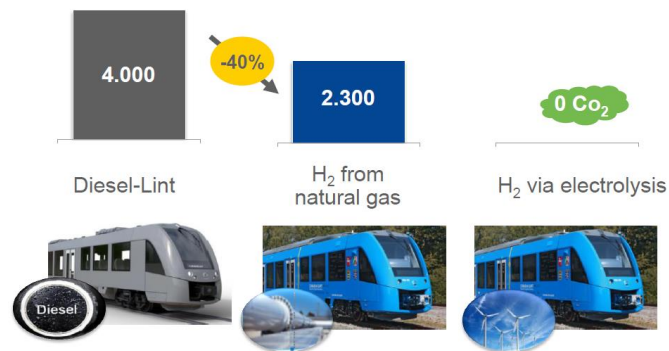
In deze paragraaf worden de techniek, de technische haalbaarheid, de kosten en de mogelijke uitrolplanning voor het toepassen van waterstof beschreven. Voordat er in wordt gegaan op de haalbaarheid (7.2.2) worden de definitie (7.2.1) en de toepassing van waterstof in de treintechniek nader toegelicht. Vervolgens wordt er ingegaan op de kosten (7.2.3) en de uitrol (7.2.4).

7.2.1 Definitie waterstof

Waterstof staat bekend als een 'groene' brandstof en kan onder bepaalde voorwaarden Zero emissie brandstof genoemd worden. Dit houdt in dat er in principe geen CO₂ uitgestoten wordt. Het verbrandingsproduct van waterstof is namelijk water. Echter is het afhankelijk van het productieproces of waterstof inderdaad Zero emissie is, omdat waterstof niet voorkomt in de vrije natuur. De onderstaande afbeelding geeft een vergelijking tussen de CO₂ uitstoot van diesel en waterstof geproduceerd op basis van aardgas en elektrolyse.

⁸ Valt buiten de expertise van Ricardo. Er is een 'educated guess' gemaakt.

CO₂-emission per train-kilometer in gram

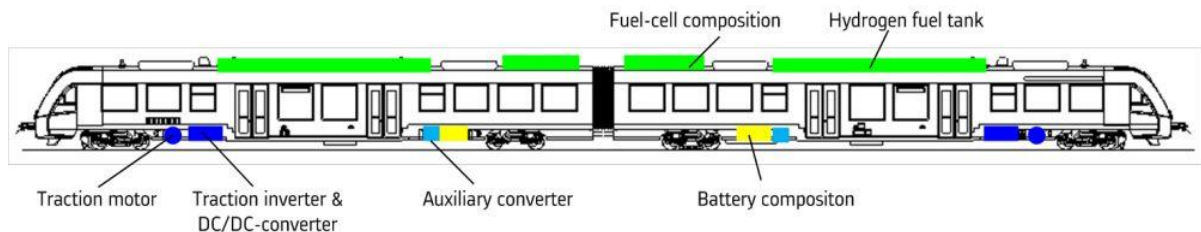


Figuur 32: Reductie van CO₂ emissie is afhankelijk van productiewijze van waterstof

In Nederland wordt er op dit moment jaarlijks ongeveer 10 miljard m³ waterstof geproduceerd, grotendeels uit aardgas. Waterstof heeft de potentie om de rol van aardgas te vervangen en speelt in combinatie met duurzame energie een belangrijke rol in de energietransitie in het algemeen [19]. Plannen voor een Noordelijke Innovation Board, de Green Deal met Dow, Yara en Gasunie voor een waterstofleiding geven aan dat waterstof op het moment een hot-item is. Verder wordt er door onder andere TenneT en Gasunie gewerkt aan een kunstmatig eiland in de Noordzee, waar offshore windenergie ter plekke wordt omgezet in waterstof [20].

Waterstof treintechniek

De toepassing van waterstof in een trein kan veel verschillende uitvoeringsvormen hebben. Een mogelijk uitvoeringsvorm is beschreven aan de hand van de waterstofrein van de fabrikant Alstom in Paragraaf 3.2.2. Dit prototype heet de Coradia iLint en is specifiek voor waterstofaandrijving ontwikkeld, waar andere fabrikanten een bestaande trein ombouwen.



Figuur 33: De samenstelling van de Coradia iLint

7.2.2 Technische haalbaarheid

Nu het duidelijk is om welke techniek het gaat, wordt in deze paragraaf besproken in hoeverre het haalbaar is om treinen op waterstof toe te passen in de provincies Fryslân en Groningen. Dit gebeurt op basis van een evaluatie van de techniek, de kosten en de toelatingsprocedure in voorbeelden uit het buitenland.

Waterstoftreinen

Er zijn meerdere waterstoftreinen in ontwikkeling, waarvan de Alstom iLint het verste gevorderd is met een tweetal toegelaten prototypes en geplande serieproductie.

In Ontario heeft Metrolinx een samenwerking met onder andere Alstom en Siemens. Metrolinx heeft recent openbaar rapport uitgebracht [21], dat op dit moment te beschouwen is als hét grote overzicht van techniek, vervoerskennis, inzichten in kosten voor waterstoftreinen, en tevens een benchmark is ten opzichte van andere energiebronnen. Het accent ligt op Canada, maar andere relevante landen zoals uiteraard Duitsland, komen ruim aan bod. Hier worden de uitkomsten beknopt besproken. Het rapport zelf is online terug te vinden.

Hoofduitkomsten van het Canadese onderzoek:

- Het is technisch mogelijk om het 'GO netwerk' om te bouwen naar een waterstof gebaseerd systeem;
- Als er gekeken wordt over de volledige levensduur van het systeem kost het in Canada op waterstof gebaseerde systeem net in zoveel als een conventioneel bovenleiding systeem.

ProRail en de waterstofrein

De Nederlandse stakeholder ProRail heeft zich enthousiast uitgelaten over waterstoftreinen. Woordvoerder Eikelboom stelt in [22]: "We willen de proeftuin van Europa worden op dit gebied. We gaan een maand tussen Groningen en Leeuwarden rijden om te zien of de trein goed inzetbaar is in Nederland. We willen heel graag verder met waterstof. Als de praktijkproef succesvol is en businesscase goed, dan gaan alle diesels weg en komt hij overal. Maar er zijn meer initiatieven. We kijken ook naar een trein op batterijstroom".

Waterstof tankstations

Op dit moment zijn er in Nederland enkele waterstof tankinstallaties aanwezig voor het wegverkeer (vrachtwagens, bussen en personenauto's), onder andere in Rhon, Arnhem en Helmond. In de provincies Groningen en Fryslân is de aanleg van de waterstof installatie in Delfzijl (Farmsum) voor bussen gerealiseerd.

In het voorjaar van 2018 heeft het Groningse bedrijf Holthausen Groep een subsidie van circa € 4 miljoen ontvangen om waterstof tankstations te bouwen in Amsterdam en Groningen. De waterstof zal met groene energie (wind/zon) worden geproduceerd. In Duitsland zijn er reeds 43

tankstations gereed en 48 in aanbouw. Dit gebeurt vooral onder leiding van de joint venture 'H2 Mobility'.

Waterstof infrastructuur Groningen

Groningen Seaports en Pipelife hebben een samenwerkingsovereenkomst getekend om de infrastructuur voor het transport van groene waterstof aan te leggen in de haven van Delfzijl en in de Eemshaven. Hiermee zet het Groningse havenbedrijf een belangrijke stap in de verdere ontwikkeling van de infrastructuur voor waterstof in haar industriegebied. In eerste instantie zal vier kilometer aan infrastructuur worden aangelegd. Het doel is om binnen een jaar tijd de leiding te realiseren. De aan te leggen infrastructuur gaat waterstof gemaakt met duurzame energie uit windmolens en zonneparken (groene waterstof) naar bedrijven die actief zijn in de chemie en industrie in de provincie Groningen transporteren.

Veiligheid waterstof

Aangezien waterstof niet alleen voor treinen als interessante energiedrager wordt gezien, maar dat waterstof ook de sleutel tot succes in de energietransitie zou kunnen zijn [19], maakt dat er veel aandacht is voor de veiligheid.

Toelating waterstofrein

Veiligheid speelt een belangrijke rol bij reizigerstreinen die waterstof als energiedrager hebben. Ook voor Alstom. De installaties van de iLint zijn goedgekeurd door de TÜV SÜD (Technischer Überwachungsverein) en de trein als geheel is goedgekeurd door de EBA (Eisenbahn-Bundesamt).

Waterstofveiligheid in het algemeen

Dit onderwerp is veelomvattend en wordt niet uitgebreid uitgewerkt. Wij beperken ons tot enkele highlights:

- Rond IFV, het Instituut Fysieke Veiligheid is een expertgroep opgericht die zich primair richt op de risico's die het bestrijden van waterstofincidenten in zich bergt. Het is de 'Community of Practice Waterstof'. Brandend waterstof heeft de tamelijk unieke eigenschap dat er geen vlam zichtbaar is. Dit kan tot verrassingen leiden, en daarom is er in de afgelopen veel schriftelijk materiaal en ook veel videomateriaal bijeengebracht om dit aspect duidelijk te maken voor hulpverleners;
- Het is belangrijk om bij de implementatie over de hele keten integrale en volledige risico analyses uit te voeren. Met name de interface tussen verschillende componenten op het gebied van materiaal en gebruik zijn belangrijk.

In rapportage van het waterstofrein-rapport van Arcadis uit 2016 [18] is veiligheid uitgebreid besproken. Hierin staan enkele verwijzingen naar andere bronnen.

7.2.3 Kosten

Deze paragraaf geeft informatie vanuit drie richtingen:

- Financiële informatie uit het voorgaande Arcadis-rapport over waterstofreinen;
- Diverse financiële informatie uit geraadpleegde bronnen;
- Planmatige kijk op de te verwachten kostenposten.

Financiële informatie uit het voorgaande Arcadis-rapport over waterstofreinen

In het Arcadis-rapport uit 2016 [18] zijn veel financiële gegevens opgenomen. Hier wordt naar verwezen in deze kostenanalyse. Met de wetenschap dat de kostenramingen niet uit 2018, maar uit 2016 zijn zullen de bedragen in het algemeen wat hoger kunnen zijn, maar de ordegrootte is richtinggevend.

Diverse financiële informatie uit geraadpleegde bronnen

Om de lopende internationale ontwikkelingen in waterstofreinen te kunnen rapporteren, zijn voor dit onderzoek veel bronnen verzameld en geraadpleegd. Dat geeft toegang tot veel financiële

gegevens. Soms zijn dit op zich zelf staande, losse gegevens, bijvoorbeeld over de kg-prijs van waterstof (die sterk kan variëren, afhankelijk van de herkomst/productiemethode en de wijze van toelevering), maar ook uitgebreide overzichten uit Duitsland en Canada [21] [23]. Belastingen kunnen mede een rol spelen of die prijs hoger of lager gaat uitvallen. Voor dit onderzoek wordt gerekend met zelf opgewekte waterstof op basis van windenergie. Hierdoor zijn de kosten op termijn beter inzichtelijk, maar mogelijk te hoog bij een dalende waterstofprijs. Met het zelf opwekken op basis van windenergie komt de kiloprijs van waterstof op circa 5 euro indien wordt uitgegaan van de investering, afschrijving en onderhoud voor 15 jaar voor de windmolens en electrolyzers. In de praktijk gaan deze langer mee en daalt de prijs per kilo. Op basis van scenariostudies naar de waterstof prijs is het mogelijk de prijs nog aanzienlijk daalt tot €2/kg.

Planmatige kijk op de te verwachten kostenposten

Aangezien in dit rapport slechts een voorontwerp is opgenomen van de Zero emissie trein is het nog niet mogelijk om een gedetailleerd kostenoverzicht te maken. Hieronder volgt een overzicht op hoofdlijnen.

Eenmalig / exploitatie	Item	Nadere informatie	Indicatieve prijs
	Noodzakelijke uitgaven		
Eenmalig	Aanschaf treinen	Mogelijke keus: Alstom Coradia iLint 5 tot 7 miljoen €/st 54 st	€ 324.000.000
Eenmalig	Ombouw bestaande treinen	1,4 milj. €/st 54 st GTW, 18 Wink	€ 100.800.000
Eenmalig	Bouw twee waterstoftankstations	Zie plan voor Bremervorde van Alstom [24] Circa € 10 miljoen.	€ 20.000.000
Eenmalig	Electrolyzers	Voor waterstofproductie van circa 10.000 kg/dag	€ 25.000.000
Eenmalig	Windmolens	Windmolens van 3 MW, per stuk, 20 stuks	€ 110.000.000
	Bijkomende kosten		
Eenmalig	Toelating trein in NL	Certificering, Tests, Administratie, Overleg	€ 1.500.000
Eenmalig	Engineering ombouw bestaande treinen		€ 5.000.000
Exploitatie	Onderhoud tankstations		€ 50.000/jr
Exploitatie	Onderhoud Electrolyzers	3% van investeringskosten	€ 750.000/jr
Exploitatie	Onderhoud windmolens		€ 3.000.000/jr

Tabel 23: Onderbouwing kosteninschatting waterstoffrein zonder opportunity charging

	Ombouw	Nieuw
Investering materieel	€ 100.800.000 € 6.500.000	€ 324.000.000 € 1.500.000
Totaal	€ 107.300.000	€ 325.500.000
Investering infra	€ 20.000.000	€ 20.000.000
Totaal	€ 20.000.000	€ 20.000.000
Investering energievoorziening	€ 135.000.000	€ 135.000.000
Totaal	€ 135.000.000	€ 135.000.000
Onderhoud	€ 3.800.000	€ 3.800.000
Totaal	€ 3.800.000	€ 3.800.000
Totaal investering	€ 262.300.000	€ 480.500.000
Totaal onderhoud (15 jaar)	€ 57.000.000	€ 57.000.000
Totaal	€ 319.300.000	€ 537.500.000

Tabel 24: Totale kosten waterstofrein zonder opportunity charging

Eenmalig / exploitatie	Item	Nadere informatie	Indicatieve prijs
	Noodzakelijke uitgaven		
Eenmalig	Aanschaf treinen	Mogelijke keus: Alstom Coradia iLint € 5 tot € 7 miljoen/st stuk 54 st	€ 324.000.000
Eenmalig	Ombouw bestaande treinen	€ 1.5 miljoen/st 54 st GTW, 18 Wink	€ 108.000.000
Eenmalig	Bouw twee waterstoftankstations	Zie plan voor Bremervorde van Alstom [24] Circa € 10 miljoen	€ 18.000.000
Eenmalig	Bouw oplaadpunten	€150.000/oplaadpaal á 11 st	€ 1.650.000
Eenmalig	Electrolyzers	Voor waterstofproductie van circa 8.000 kg/dag	€ 21.000.000
Eenmalig	Windmolens	Windmolens van 3 MW, per stuk, 20 stuks	€ 110.000.000
	Bijkomende kosten		
Eenmalig	Toelating trein in NL	Certificering, Tests, Administratie, Overleg	€ 1.500.000
Eenmalig	Engineering ombouw bestaande treinen		€ 6.000.000
Exploitatie	Onderhoud tankstations		€ 50.000/jr
Exploitatie	Onderhoud oplaadpunten	€ 2.000/oplaadpaal á 11 st	€ 22.000/jr
Exploitatie	Onderhoud Electrolyzers	3% van investeringskosten	€ 630.000/jr
Exploitatie	Onderhoud windmolens		€ 3.000.000/jr

Tabel 25: Onderbouwing kosteninschatting waterstofrein met opportunity charging

	Ombouw	Nieuw
Investering materieel	€ 108.000.000 € 7.500.000	€ 324.000.000 € 1.500.000
Totaal	€ 115.500.000	€ 325.500.000
Investering infra	€ 18.000.000 € 1.650.000	€ 18.000.000 € 1.650.000
Totaal	€ 19.650.000	€ 19.650.000
Investering energievoorziening	€ 21.000.000 € 110.000.000	€ 21.000.000 € 110.000.000
Totaal	€ 131.000.000	€ 131.000.000
Onderhoud	€ 3.752.000	€ 3.752.000
Totaal	€ 3.752.000	€ 3.752.000
Totaal investering	€ 266.150.000	€ 476.150.000
Totaal onderhoud (15 jaar)	€ 56.280.000	€ 56.280.000
Totaal	€ 322.430.000	€ 532.430.000

Tabel 26: Totale kosten waterstofrein met opportunity charging

7.2.4 Planning uitrol

Voor de waterstofrein is de uitrol pas aan de orde, nadat een beslissing is genomen, op welke manier en met welk materieel de mogelijke introductie gestalte gaat krijgen. Er staat bij de keuzes een inschattingen van een planning met de kortste doorlooptijd en bijbehorende kritische stappen.

Stap 1: Keuze materieel

Bestaande treinen ombouwen van diesel naar een waterstofrein. Dat is in principe een optie voor ieder type, ware het niet dat het sterk afhankelijk is van de eigenschappen van een trein (gewicht, benodigde ruimte voor installaties, aandrijving, warmteafvoer, positie zitplaatsen etc.). Stadler is momenteel een ontwerp aan het maken voor het ombouwen van de huidige GTW's van Arriva naar waterstof.

Verwachte beschikbaarheid vanaf 2021; in exploitatie vanaf 2024. Kritisch is verdere ontwikkeling van het materieel, contractering voor ombouw en ombouw zelf.

Aanschaf commercieel treinproduct met waterstoftank en brandstofcel aan boord. Nu alleen de Alstom Coradia iLint als optie, op langere termijn naar verwachting Stadler treintypen en Siemens Mireo typen.

Verwachte beschikbaarheid vanaf 2022; in exploitatie vanaf 2024. Kritisch zijn de bestelling van materieel, de toelating en fabricage.

Stap 2: Infrastructuur voor waterstofbevoorrading

Tankstation(s) van een mobiel of stationair soort. De markt voor H₂-tankinstallaties is sterk in ontwikkeling. Ieder soort tankinstallatie heeft eigen aandachtsgebieden:

- Aanvoer van waterstof: Per buisleiding, over de weg, over het water, of productie in het tankstation zelf (elektrolyse van water);
- Herkomst en zuiverheid waterstof;
- Maximale aanwezige hoeveelheid waterstof (H₂) in het station;
- Vergunningen en regelgeving hieromtrent.

Plaatsen van laadpalen op alle geselecteerde locaties. Omdat de doorlooptijd voor een aansluiting op het net een jaar kan duren, deze vroegtijdig aanvragen. Verwachte beschikbaarheid vanaf 2021 (mobiel) of 2022 (vast). Kritisch is contractering leverancier, vergunningen en de bouw.

Stap 3: Certificering en toelating van de treinen:

- Traject met Inspectie Leefomgeving en Transport. Het mogen rijden met treinen, met welke energiebron dan ook, moet worden verworven op grond van gedegen toetsen en bewijsvoeringen. Hierbij valt de waterstofrein in de categorie overig. Een langere doorlooptijd dan normaal wordt verwacht.

- Veiligheid: anticiperen op risico's in de exploitatie. Een uiteindelijk goedgekeurd treintype betekent niet dat de implementatie gereed is, of beter gezegd dat de veiligheid op orde is.

7.3 Methanol

In deze paragraaf worden de techniek, de technische haalbaarheid voor het toepassen van methanol besproken. Hierbij gaat de eerste paragraaf in op wat wordt verstaan methanol (7.3.1), daarna komt de technische haalbaarheid aan bod (7.3.2) en als laatste de ontwikkelroute voor treinen die op methanol rijden (7.3.3).

Tijdens het onderzoek is er geconcludeerd dat de railvoertuigindustrie op dit moment niet lijkt te kiezen voor methanol als vervanging voor diesel. Daarom zijn er geen concrete cijfers op het gebied van treinen die op methanol rijden.

7.3.1 Definitie methanol

Methanol ofwel methylalcohol, met de molecuulformule CH_3OH , is een veelzijdig toegepaste brandbare vloeistof. De stof is bekend als motorbrandstof echter in methanol-houdende mengsels. De toepassing in de transportwereld is niet gangbaar met 100% methanol.

Industrieel wordt methanol op zeer grote schaal geproduceerd en weer als grondstof voor de productie van andere stoffen toegepast. Behalve brandbaar (en onder bepaalde omstandigheden explosief) is het ook giftig en daarom is veiligheid een belangrijk aandachtspunt. Hieronder volgt een overzicht van de soorten methanol die in dit rapport besproken worden.

- **Methanol:** Neutrale aanduiding voor de stof. De herkomst is van ondergeschikt belang.
- **Biomethanol:** Methanol dat geproduceerd is uit biomassa (in plaats van uit fossiele grondstoffen).
- **Groene methanol:** (kleurloos) methanol dat wordt geproduceerd uit de reactie tussen waterstof (H_2) en CO_2 .

In alle drie gevallen gaat het om dezelfde chemische verbinding, maar de manier van produceren is anders. Ook de zuiverheid kan verschillen.

Methanol in algemene zin staat bekend als een 'groene' brandstof, maar dit is niet per definitie zo. Deze term slaat terug op de uitstoot van CO_2 . De normale verbrandingsproducten van methanol zijn CO_2 en water, dit maakt het per definitie geen groene brandstof, tenzij alle CO_2 wordt opgevangen. Dit is wel realistisch voor stilstaande toepassingen, maar niet voor voertuigen. Wel heeft methanol andere pluspunten ten opzichte van conventionele brandstoffen, bijvoorbeeld het ontbreken van zwavel, een stof die zeer slecht is voor het milieu.

De keten om methanol te produceren kan per situatie verschillen, wat betekent dat sommige methanoltoepassingen dicht(er) bij of verder weg liggen van een Zero emissie predicaat. Omdat methanol in de vrije natuur niet als grondstof voorkomt, is een voorafgaand productieproces noodzakelijk. Methanol kan op veel verschillende manieren geproduceerd worden. Eén van de mogelijke manieren is het omzetten van waterstof in methanol. De Noordelijke Innovation Board is actief met het ontwerpen van een industriële vernieuwing met een duidelijk groen stempel. Groene methanol is dus niet alleen een idee, maar inmiddels een industriële werkelijkheid.

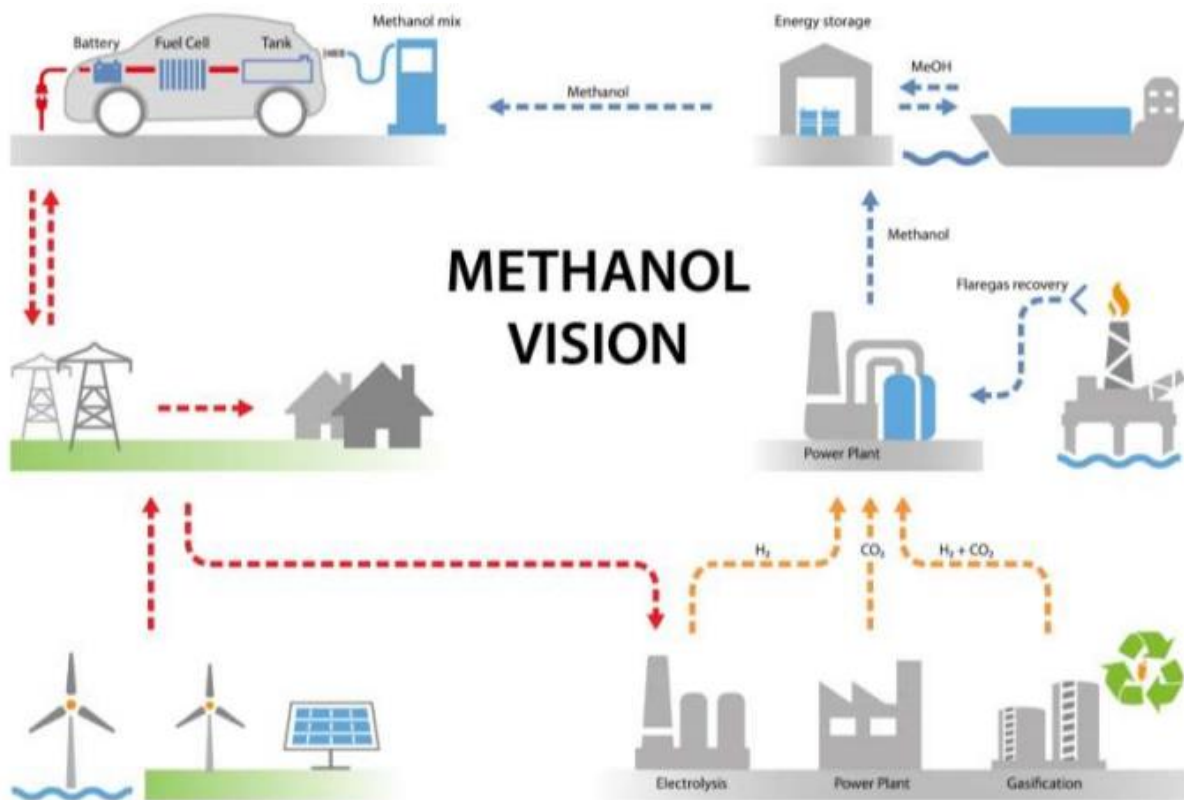
7.3.2 Technische haalbaarheid

Voor railtransport zijn er geen berichtgevingen en literatuur over treinen met methanol als energiebron gevonden met betrekking tot commerciële ontwikkelingen. Daarom wordt er in deze paragraaf ook ingegaan op wegverkeer en scheepvaart.

Wegverkeer

In het wegverkeer is methanol aan de ene kant een vertrouwde stof, maar aan de andere kant juist niet. (Bio)methanol komt namelijk als bestanddeel van benzine en (bio)diesel voor, maar als pure brandstof is het zeer zeldzaam. In California/USA zijn wordt het al meer toegepast als brandstof. Mercedes is daar al vanaf 2002 actief ten behoeve van stadsbussen en later ook voor

personenwagens (het NECAR 5-project van CaFCP). Men spreekt consequent van 'methanol mix' als brandstof, in plaats van methanol; het gaat dan ook om een mengsel van 60% methanol en 40% water [25]. De onderstaande figuur geeft een overzicht van de visie [26].



Figuur 34: Visie om met (deels groene) methanol een brandstofcel in een personenauto te activeren [26]

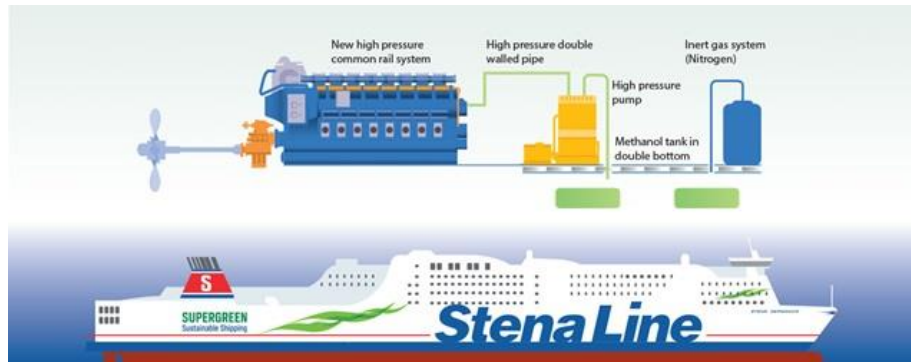
Uit IJsland, in samenwerking met Chinese partners, zijn personenauto's rijdend op Vulcanol vermeldenswaardig. Vulcanol is de merknaam voor groene methanol uit de fabriek in Grindavik in zuidwest IJsland. De producent van deze groene methanol is CRI (Carbon Recycling International) en dit bedrijf is volop bezig met de ontwikkeling voor transport op methanol op de weg.



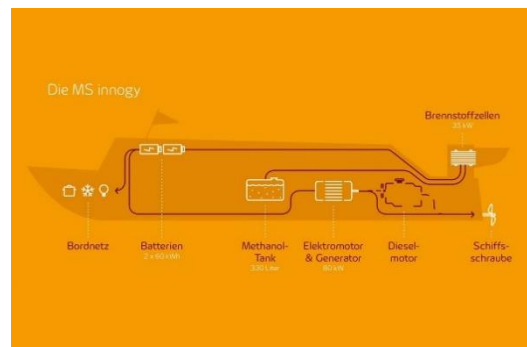
Figuur 35: Chinese auto (Geely; partner van Volvo), geschikt om te rijden op IJslandse methanol [27]

Scheepvaart

Varen op methanol is sinds enige jaren een bestaande praktijk. Twee sprekende voorbeelden zijn de ferryboot Stena Germanica en het passagiersschip MS Innogy [28].

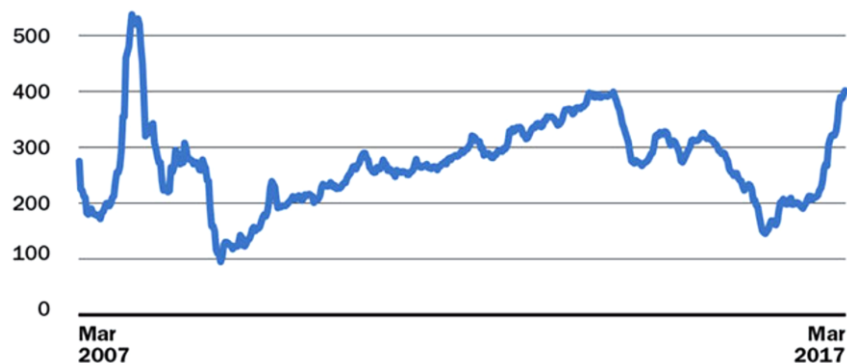


Figuur 36: Ferry Stena Germanica die vaart tussen Kiel en Göteborg met methanol als brandstof



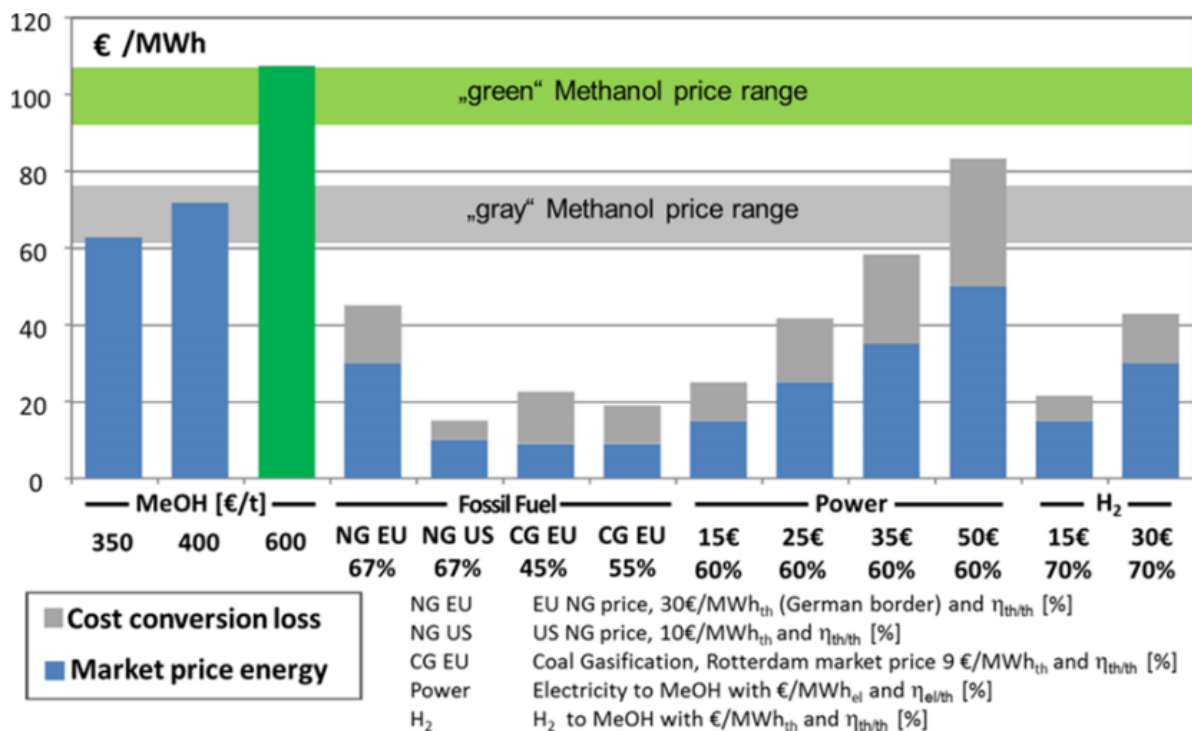
Figuur 37: Passagierschip MS Innogy in het Ruhrgebied met brandstofcel op basis van methanol

Kijkend naar de prijs van methanol in de onderstaande figuur kan er geconcludeerd worden dat de prijs de afgelopen 10 jaar flink geschommelde. Dit maakt het lastig om hier een stabiele businesscase op te bouwen.



Figuur 38: De prijs van methanol over een periode van 10 jaar (prijs in euro per ton)

In de onderstaande tabel wordt de prijs van methanol, fossiel brandstoffen, elektriciteit en waterstof (blauw) met daarbovenop de kosten van de omzetting van de overige brandstoffen naar methanol (grijs) gegeven. Hieruit kan geconcludeerd worden dat (indirect) op fossiele brandstoffen gebaseerde methanol nog een stuk voordeliger is dan groene waterstof.



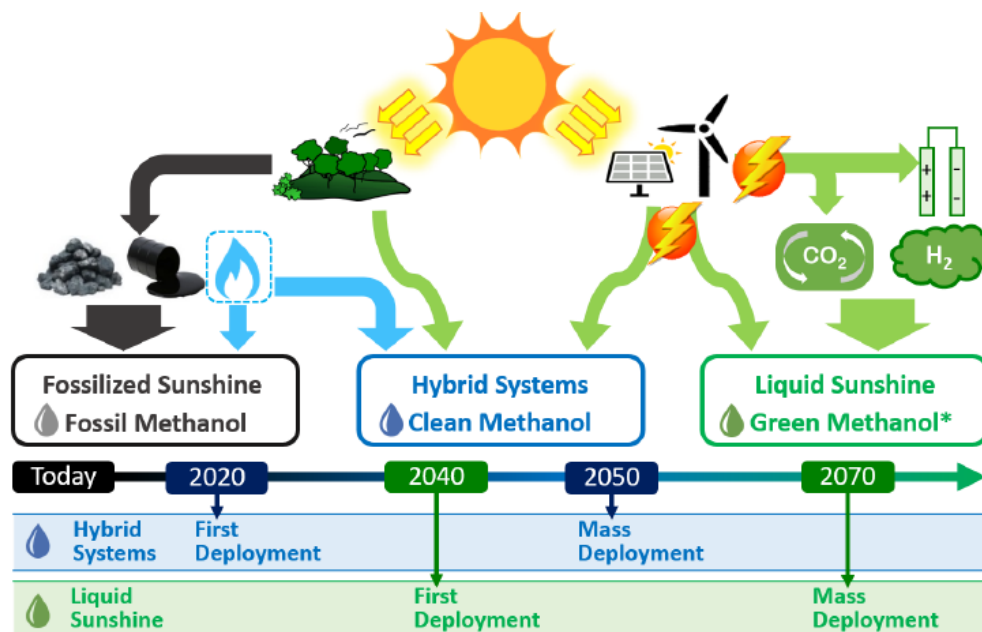
Figuur 39: Prijsrange voor methanol en andere scheepsbrandstoffen [29]

Treinverkeer

Er wordt in openbare bronnen weinig gesproken over treinen in combinatie met methanol. In de academische literatuur wordt er wel over gesproken, maar dit is nog op fundamenteel niveau. Een voorbeeld hiervan is een onderzoek van de TU Delft [25], waarin het effect van methanol op verbrandingsmotoren beschreven wordt.

De vraag of een methanolrein een reële optie is voor de provincie Fryslân kan hiermee niet beantwoord worden op basis van voorbeeldprojecten. De ontwikkelingen staan nog in de kinderschoenen en er zijn geen voorbeelden van dergelijke treinen die productierijp zijn. Als er theoretisch naar de vraag gekeken wordt is een methanolrein technisch mogelijk, aangezien methanol al gebruikt wordt als brandstof in het weg- en waterverkeer.

Technische ontwikkelingen in India en China geven een goed beeld van dat er wel ontwikkelingen zijn. De intentie in deze landen is om diesel als brandstof voor locomotieven te vervangen door methanol of methanolrijke mengsels [30] [31]. De Indiase overheid steunt de initiatieven van de Indian Railways die direct samenhangen met de klimaat-problematiek. Hiervoor is een routekaart opgesteld voor het reduceren van CO₂ en andere belastende uitstoten. De routekaart is opgenomen in de onderstaande figuur. Hieruit kan de conclusie getrokken worden dat er gefocust wordt op een combinatie van methanol uit fossiele bronnen, schone methanol (uit een combinatie van bronnen) en groene methanol (uit duurzame energie).



Figuur 40: Visie op de toekomst voor groene methanol in India [30]

Methanoltankstations

Om een impressie te krijgen van de mogelijkheden om methanol te tanken, beschrijven we in het kort het in Denemarken in 2015 geopende tankstation voor het wegverkeer. Deze is opgezet onder de consortiumnaam Green Methanol Infrastructure (OK, Hamag en SerEnergy) [32]. Het gunstige van methanol is, dat het net als benzine en als diesel in een klassieke tankstation-infrastructuur kan worden ingebed, in tegenstelling tot waterstof (los van technologische ontwikkelingen die nog in de kinderschoenen staan). Vanwege de atmosferische omstandigheden kunnen een slang en een gangbare spuitmond volstaan om te tanken. Ook de brandstoftanks in treinen kunnen dezelfde maatvoering houden. De energiedichtheid is namelijk vergelijkbaar met die van diesel.

Specifiek voor de railsector is in Nederland of elders in Europa nog geen tankstation voor methanol gerealiseerd. Daarbij kan opgemerkt worden dat Methanol relatief eenvoudig te transporteren is. Op die manier zou er dus in eerste instantie voor gekozen kunnen worden om mobiele tankstations te gebruiken, voordat eventuele vaste tankstations gerealiseerd zijn. Binnen Nederland bestaan er al enkele industrieterreinen met buisleidingen voor methanol. Het is echter nog niet gebruikelijk om methanol over lange afstanden te transporteren door middel van buisleidingen.

Veiligheid

Bij de invoering van methanol is de (arbeid)veiligheid niet als kritisch te beschouwen, omdat de eigenschappen van methanol zoals de brandbaarheid en de giftigheid redelijk vergelijkbaar zijn met die van diesel. Wel zou het kunnen zijn dat de toelating in Nederland enige tijd in beslag kunnen nemen, aangezien het in het kader van treinen om een nieuwe techniek gaat.

7.3.3 Planning uitrol

Gezien de strekking van dit hoofdstuk dat er geen concrete signalen zijn uit de treinbouw-industrie (Alstom, Bombardier, Stadler, Siemens en andere) om te kiezen voor methanoltreinen, is het de vraag of het anticiperen op toekomstige implementatie op dit moment zinvol is.

Ook bij gebruik of inbouw in bestaande treinen is het een vereiste om de fabrikant van de trein te betrekken bij het onderzoek en eventuele experimenten. Dit is bijvoorbeeld al van toepassing bij het percentueel vervangen van diesel door een diesel-methanol-mengsel met oplopend aandeel van methanol in een bestaande reizigerstrein/brandstoftank-constructie. Dit is omdat een motor met

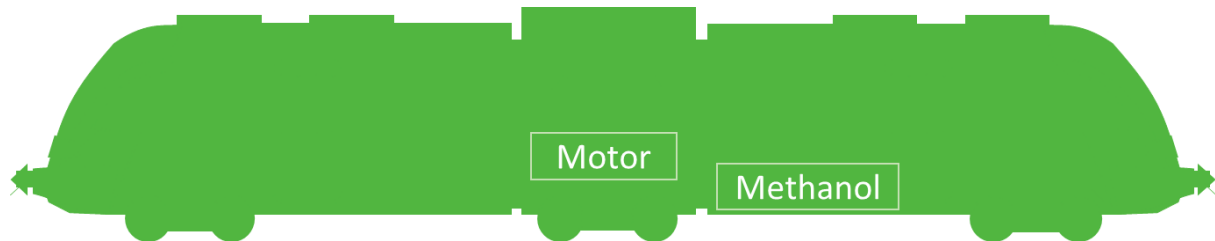
toebereiden altijd is geoptimaliseerd voor een brandstof met strikte chemische en fysische eigenschappen.

In het scenario dat een partij binnen de treinbouwindustrie duidelijk geïnteresseerd is, kan in overleg worden besloten om één van de onderstaande 3 aanpakken te gebruiken:

- Toetsen technische mogelijkheden om de bestaande treinen te laten rijden op diesel-methanolmengsel of (groen) methanol (eventueel met water of met Bio Diesel). In dit geval is het nog geen Zero emissie trein, maar is het wel een verbetering ten opzichte van een volwaardige diesteltrein;
- Vervanging van dieselinstallaties voor methanolinstallaties (brandstofcel) in bestaande diesteltreinen;
- Ontwikkelen van een geheel nieuwe methanoltrein.

De eerste 2 aanpakken zouden op relatief korte termijn uitgevoerd worden door een combinatie van de provincies en stakeholders zoals Arriva en een treinenbouwer. De doorlooptijd is naar schatting enkele jaren.

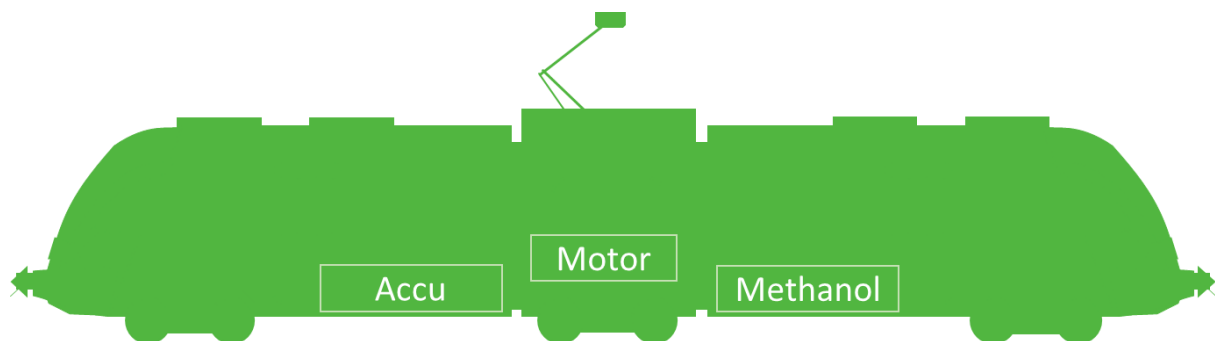
Voor de derde aanpak is er brede belangstelling nodig vanuit de markt om het voor een treinenbouwer interessant te maken om een nieuwe trein te ontwikkelen. Daarnaast neemt het ontwikkelen van een nieuwe trein inclusief toelatingsprocedure al snel meer dan 5 jaar in beslag.



Figuur 41: Concept Methanoltrein

Methanol en opportunity charging

Bij het conceptueel ontwerpen van een trein op methanol is het mogelijk om een hybride aandrijflijn toe te passen met batterijen en opportunity charging. Naast de motor en brandstoftanks kunnen dan batterijen worden toegevoegd om de remenergie op te slaan alsmede om te laden op stations of op het opstel terrein. De trein kan dan gedeeltelijk elektrisch rijden en het methanolverbruik beperken afhankelijk van de gekozen verhoudingen.



Figuur 42: Concept Methanoltrein met opportunity charging

8 Samenvatting kosten

8.1 Kosten totaal

De totale investeringskosten inclusief onderhoud over 15 jaar zijn voor de varianten *Batterijtrein met opportunity charging en partiële bovenleiding*, *waterstof met opportunity charging en ombouw* en *waterstof met opportunity charging en nieuwbouw* weergegeven in Tabel 27.

	Batterijtrein ombouw +bovenleiding [miljoen]	Waterstof met OC en ombouw [miljoen]	Waterstof met OC en nieuw [miljoen]
Investering materieel	€ 57	€ 115	€ 325
Investering infrastructuur (oplaadstation en bovenleiding)	€ 47	€ 20	€ 20
Investering Energie	€ 27,5	€ 131	€ 131
Onderhoud (15 jaar)	€ 18,5	€ 56	€ 56
Totaal	€ 150	€ 322	€ 532

Tabel 27: overzicht totaalkosten verschillende range-extenders

Uit bovenstaande kan geconcludeerd worden dat een batterijtrein met opportunity charging en partiële bovenleiding de financieel meest aantrekkelijke optie is. Grootste factoren die invloed hebben op deze tabel zijn de technologische ontwikkelingen voor laadpalen, batterijen, brandstofcellen en de ontwikkelingen van de prijs van waterstof.

Bij de keuze voor NCM batterijen zijn de infrastructuur kosten iets lager, zie hoofdstuk 7 en bijlage G.

8.2 Kosten per traject

In de vorige hoofdstukken zijn de kosten voor de optie partiële bovenleiding en waterstof bepaald en het energieverbruik per traject (zie ook Bijlage F Energiegebruik per traject). In dit hoofdstuk wordt op basis van die informatie een overzicht gegeven van de kosten per traject met de volgende uitgangspunten:

- Verdeling investeringskosten gaat naar rato van aantal gereden treinkilometers per traject;
- Voor de verdeling van de kosten van de laadstations wordt gekeken per traject hoeveel laadstations er gebruikt worden voor opladen. Dit betekent wel dat de kosten van een laadstation soms dubbel worden doorberekend bij verschillende trajecten. Bij het optellen van de kosten per lijn voor het totaal kostenoverzicht zal dit dus iets hoger uitvallen dan als alle investeringskosten in één keer worden gedaan en de kosten voor de laadstations maar één keer worden meegenomen. Er worden nu 2 laadstations 'teveel' meegeteld bij de totaal kosten;
- Verdeling exploitatiekosten gaat naar rato van aantal gereden treinkilometers per traject en worden voor 15 jaar bepaald;
- De investeringskosten van de bovenleiding op de opstel terreinen bij Groningen en Leeuwarden en bij de stations van Groningen en Leeuwarden zijn niet apart per traject meegenomen.

In Tabel 28 is het overzicht te vinden van de totaalkosten per traject.

Traject	Totaal batterijtrein ombouw+ bovenleiding [miljoen]	Totaal nieuw H2 trein [miljoen]	Totaal H2 trein ombouw [miljoen]	Totaal H2 trein ombouw + OC [miljoen]
Leeuwarden - Stavoren	€ 11,7	€ 54,7	€ 27,7	€ 28,5
Leeuwarden - Sneek	€ 6,7	€ 36,1	€ 13,3	€ 13,9
Leeuwarden - Harlingen	€ 9,2	€ 50,0	€ 22,8	€ 23,63
Leeuwarden - Groningen Europapark (snel+stop)	€ 42,6	€ 206,0	€ 111,6	€ 113,7
Delfzijl- Veendam	€ 24,3	€ 113,5	€ 59,5	€ 60,7
Eemshaven- Leer	€ 37,6	€ 185,1	€ 85,4	€ 88,0
Totaal	€ 132,1⁹	€ 645,5	€ 320,3	€ 328,4

Tabel 28: Overzicht kosten per traject

Uit dit overzicht kan geconcludeerd worden dat een batterijtrein met partiële bovenleiding de financieel meest aantrekkelijke optie is. Het volgende hoofdstuk geeft de overall conclusie.

⁹ Dit is exclusief de investeringskosten van € 17.7 miljoen voor de bovenleiding op opstel terreinen en bij Leeuwarden en Groningen en exclusief € 3.5 miljoen voor leges en vervangend vervoer.

9 Conclusies en aanbevelingen

9.1 Conclusies

In dit rapport zijn verschillende oplossingen bekeken voor een Zero emissie trein in Groningen en Fryslân. Er is een overzicht gegeven van de diverse treintypes en technische mogelijkheden van verschillende batterij- en oplaadtypen.

Met de beoogde dienstregeling zijn simulaties gedaan om vast te stellen hoeveel batterijcapaciteit noodzakelijk is. Met deze uitkomsten is gekeken naar de kosten van de verschillende oplossingen. Hieronder de belangrijkste conclusies per thema:

Treintechniek: In Japan zijn er batterijtreinen met beperkte prestaties in commerciële dienst. Daarnaast zijn al meerdere trams met batterijen in commerciële dienst. Er zijn tot nu toe wereldwijd nog geen waterstoftreinen in commerciële dienst (wel gepland in 2021). Er wordt door verschillende bekende fabrikanten gewerkt aan waterstoftreinen, dus volgens de treinfabrikanten is waterstof een goede oplossingsrichting voor Zero emissie treinen.

Batterijtechniek: Er zijn zeer veel verschillende batterijen. In dit onderzoek hebben we de vijf meest voorkomende soorten vergeleken. Op basis van de benodigde vermogen, Laadtijd, gewicht, levensduur en kosten komt in eerste instantie de Lithium Titanaat Oxide (LTO)-batterij als beste naar voren voor toepassing in een Zero emissie trein. Aanvullend is nog een korte analyse gemaakt met NCM batterijen gezien de positieve ervaringen bij elektrische bussen en auto's. Ook deze optie is een goede mogelijkheid.

Laadtechnieken: Hier zijn drie verschillende technieken vergeleken. Voor het benodigde vermogen, de periode van het laden (kort) en het verbruik is een laadpunt boven de trein bij stations in combinatie met een pantograaf op de trein de beste oplossing (opportunity charging). De manier van laden wordt aangevuld met 'overnight charging' op opstelterreinen, zodat er met een volle batterij gestart kan worden.

Energiescenario's: Alle trajecten in Groningen en Fryslân zijn gemodelleerd om de benodigde energie te bepalen. Arcadis en Ricardo gebruikten elk hun eigen model. Door het kiezen van dezelfde uitgangspunten en de juistheid van de modellen zijn er consistente uitkomsten gegenereerd en geverifieerd. In de modelleringen is er rekening gehouden met de toename van het gewicht van de treinen i.v.m. de batterijen aan boord. Door uit te gaan van een worstcase situatie is het mogelijk om onder alle verwachte omstandigheden de dienstregeling met deze treinen te kunnen rijden. In de praktijk zal het energieverbruik lager zijn.

Bij ombouw van een GTW 2/6 moet deze worden uitgerust met een pantograaf en totaal 7,5 ton batterijen, deels geplaatst in de power module en op/onder/in de trein. Afhankelijk van de trajecten is een batterij alleen niet voldoende en dient er een range-extender toegepast te worden. In dit rapport zijn de range-extenders partiële bovenleiding, waterstof en methanol onderzocht, waarvan de conclusies hieronder samengevat zijn.

Range-extendors:

- *Partiële bovenleiding:* In de provincie Fryslân waar de wachttijden op met name de eindstations langer zijn, is het laadstation met 5 MW aan vermogen op de meeste trajecten voldoende, behalve bij Leeuwarden waar ook 6,5 km bovenleiding nodig is. In Groningen moet er, naast de laadstations met 5 MW aan vermogen ook 4 km bovenleiding worden geplaatst richting Groningen Europapark. Daarnaast dient er bovenleiding gerealiseerd te worden op de opstelterreinen in Groningen en Leeuwarden zodat er gedurende de nacht (langzaam) opgeladen kan worden.
- *Waterstof:* Doordat waterstof lichter is per energie-eenheid dan elektriciteit in batterijen kan er meer energie meegenomen worden in de treinen en is er geen partiële bovenleiding nodig. Ook kan het eventueel bijladen van de bufferbatterijen plaatsvinden via lichtere laadpalen van 600 kW.
- *Methanol:* De railvoertuigindustrie lijkt op dit moment niet te kiezen voor methanol als vervanging voor diesel. Er zijn verschillende ontwikkelingen op zowel het gebied van auto's als

schepen, waardoor het mogelijk in de toekomst wel interessant kan worden. Op dit moment zijn er echter onvoldoende aanknopingspunten om dit als een serieus alternatief te beschouwen voor een Zero emissietrein.

Beantwoording onderzoeksvraag: Aan het begin van het rapport is de volgende onderzoeksvraag gesteld:

- 'Wat is de haalbaarheid van een Zero emissie spoorvervoer middels een batterijtrein met opportunity charging in combinatie met aanvullende energievoorziening via hetzij zo weinig mogelijk partiele bovenleiding, waterstof, of methanol als range-extender?'

Het antwoord op de onderzoeksvraag is dat het mogelijk is om met Zero Emissie treinen de beoogde dienstregeling te rijden. De Zero emissie trein zal een trein moeten zijn die is voorzien van voldoende batterijcapaciteit aangevuld met partiële bovenleiding of brandstofcellen op waterstof. De exacte capaciteit van de batterijen hangt af van de keuzes die gemaakt worden voor de hoeveelheid bovenleiding of waterstof in de trein. Dit dient uitgewerkt te worden in een detail ontwerp. Methanol is afgefallen als optie, omdat er tot nu toe in de railsector weinig tot geen ontwikkelingen zijn op dit gebied.

De kosten op basis van het globale ontwerp zijn voor beide varianten van treinmaterieel en bijbehorende infrastructuur vergeleken en te zien in Tabel 29.

	Batterijtrein ombouw +bovenleiding [miljoen]	Waterstof met OC en ombouw [miljoen]	Waterstof met OC en nieuw [miljoen]
Investering materieel	€ 57	€ 115	€ 325
Investering infrastructuur (oplaadstation en bovenleiding)	€ 47	€ 20	€ 20
Investering Energie	€ 27,5	€ 131	€ 131
Onderhoud (15 jaar)	€ 18,5	€ 56	€ 56
Totaal	€ 150	€ 322	€ 532

Tabel 29: Vergelijking kosten trein varianten

Grootste factoren die invloed hebben op deze tabel zijn de technologische ontwikkelingen voor laadpalen, batterijen, brandstofcellen en de ontwikkelingen van de prijs van waterstof.

Bij toepassing van NCM batterijen zijn de investeringskosten in materieel vergelijkbaar maar kunnen de kosten voor infrastructuur dalen met € 4 miljoen (minder oplaadstations). Verdere detailengineering zal moeten uitwijzen welk batterijtype op aspecten als veiligheid, levensduur, kosten etc. de juiste keuze is voor toepassing in treinen.

9.2 Discussie

De huidige GTW treinen hebben een levensduur van ongeveer 30 jaar. De oudste zijn vanaf 2006 in dienst. Rond 2025 hebben ze hun halve levensduur gehad. En aan het einde van de concessie (december 2035) zijn ze nagenoeg afgeschreven. Dit biedt de ideale mogelijkheid om tijdens de komende concessie te experimenteren met het ombouwen van de treinen zodat bij de start van de concessie 2035 en verder alle treinen Zero emissie kunnen worden uitgevraagd. Op basis van dit theoretisch onderzoek lijkt het al mogelijk om alle treinen in de periode 2020 - 2035 om te bouwen naar Zero emissie. Daarbij is het wel verstandig om te kijken op welk moment welke investeringen gedaan worden. Zowel de batterij als de brandstofcel dienen om de 15-20 jaar vervangen te worden waardoor een ombouw vanaf 2021 het meest gunstig lijkt, indien men materieel blijft inzetten conform dienstregeling 2023.

Zaken die niet meegenomen zijn in de afweging zijn potentiële operationele wijzigingen die noodzakelijk zijn om voor 2035 Zero emissie treinen operationeel te hebben. Te denken valt hierbij aan aangepast onderhoud (momenten, werkzaamheden, outillage, tijdsduur), rangeerplan, dienstregeling (keertijden, materieelplan en dergelijke). Ook de onttrekking van treinen voor het

ombouwen en de effecten die dat zal hebben op de dienstverlening van Arriva is niet gekwantificeerd. Dit heeft wel invloed op de definitieve keuze van de range-extender.

Bij gunning van de nieuwe concessie in 2035 ligt het voor de hand om Zero emissie treinen te eisen. Daarbij moet op voorhand duidelijk zijn welke scenario gekozen is; batterijtrein met opportunity charging + partiële bovenleiding of waterstof of een gemengd park, zodat de nodige voorbereidingen getroffen kunnen worden voor de benodigde infrastructuur.

9.3 Aanbevelingen

Onafhankelijk van welke oplossing wordt gekozen, is het raadzaam om in het detail ontwerp de exacte verhouding tussen de batterijen en lengte partiële bovenleiding, of waterstofcapaciteit te bepalen.

Ten aanzien van de energievoorziening is het raadzaam tijdig samenwerking te zoeken met de netbeheerders om naar de optimale oplossing voor de levering van energie te zoeken.

Bij dit rapport is rekening gehouden met de verschillende tracés. Gezien het uniform houden van veiligheids- en onderhoudsprocedures en het waarborgen van de uitwisselbaarheid van materiaal is het strategisch om te kiezen uit één range-extender en maximaal twee batterij- of twee batterij-waterstof-treinconfiguraties. Het is ook mogelijk om bijvoorbeeld een andere keuze te maken in Fryslân dan in Groningen. Wanneer er een keuze wordt gemaakt voor een oplossing is het advies deze verder uit te diepen en hier één of meerdere pilots mee te houden alvorens over te gaan tot een volledige invoering.

Gezien de huidige stand van de techniek en de verwachte technologische ontwikkelingen is het aan te bevelen om in de nieuwe concessie, vanaf 2035, volledig over te gaan naar Zero emissie. Tot dat moment is er gelegenheid om pilots te draaien voor detail engineering van het ontwerp, verdere risico's te beperken en de toelating. De aankomende periode kan dan worden gebruikt voor het maken van een keuze, het aanvragen van vergunningen, het investeren in infrastructuur en het oppakken van de ontwikkeling met huidige en toekomstige belanghebbenden.

Verwijzingen

- [1] Eurobat, Motive Power batteries, Battery technology for motive off-road application, 2017.
- [2] Leclanché, 2018. [Online]. Available: <http://www.leclanche.com/>.
- [3] Battery University, „Summary Table of Future Batteries,” 2016. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_218_summary_table_of_future_batteries.
- [4] MOBI Research Group, Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030, 2017.
- [5] "theconversation.com," 2018. [Online]. Available: <https://theconversation.com/teslas-batteries-have-reached-their-limit-heres-how-they-could-go-further-64765>.
- [6] N. Fildes, „Beyond lithium - the search for a better battery,” 2018. [Online]. Available: <https://www.ft.com/content/46adb98c-d8ef-11e7-9504-59efdb70e12f>.
- [7] Aquabattery, „Product,” 2018. [Online]. Available: <http://aquabattery.nl/product-2/>.
- [8] Bloomberg New Energy Finance, Electric busses in cities – driving towards cleaner air and lower CO₂, 2018.
- [9] "wikipedia.org," 2018. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/EV-E301_series.
- [10] Stadler, „P3733 ARRIVA NOORDNED - FLEET STRATEGY & BUDGETARY PRICES,” 2017.
- [11] Alstom, „Coradia iLint, a full emission-free train,” 2016.
- [12] I. S. a. W. C. Jeongyong Kim, An Electric Bus with a Battery Exchange System, 2018.
- [13] Schunk Smart Charging, „Schunk Smart Charging,” 2018. [Online]. Available: <https://www.schunk-carbontechnology.com/en/smart-charging/>.
- [14] Heliox Automotive B.V., "Opportunity Charger 600 kW," 2018. [Online]. Available: https://www.heliox.nl/images/products/PDF/Opportunity_Charger_600_kW.pdf.
- [15] OppCharge, „FAST CHARGING OF ELECTRIC VEHICLES,” 2018. [Online]. Available: <https://www.oppcharge.org/>.
- [16] Heliox, „Products,” 2018. [Online]. Available: <https://www.heliox.nl/products>.
- [17] Bombardier Primove, „PRIMOVE wireless charging,” 2018. [Online]. Available: <http://primove.bombardier.com/products/charging.html>.
- [18] Arcadis, Onderzoek batterij-waterstofrein, 2016.
- [19] J. Aué, „De rol van waterstof binnen de Energietransitie,” 2018.
- [20] TenneT, „North Sea Wind Power Hub,” 2018. [Online]. Available: <https://www.tennet.eu/our-key-tasks/innovations/north-sea-wind-power-hub/>.
- [21] Inc., Jacobs Engineering Group; Inc., Ernst & Young Orenda Corporate Finance; Laboratories, Canadian Nuclear, Regional Express Rail Program Hydrail Feasibility Study Report, 2018.

- [22] Algemeen Dagblad (AD), "Dieselboemeltjes worden vervangen door schone treinen op waterstof," 2018. [Online]. Available: <https://www.ad.nl/economie/dieselboemeltjes-worden-vervangen-door-schone-treinen-op-waterstof~ac1a2cc4/>.
- [23] B. & NOW, Ergebnisbericht Studie Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene, 2016.
- [24] "niedersachsen.de," 2018. [Online]. Available: <https://www.mw.niedersachsen.de/aktuelles/presseinformationen/minister-lies-die-zukunft-beginnt-in-niedersachsen-159367.html>.
- [25] B. Lee, The effects of methanol fuel on combustion in premixed dual fuel engine, 2016.
- [26] M. F. Jensen, "brintbranchen.dk," 2018. [Online]. Available: <https://brintbranchen.dk/wp-content/uploads/2018/04/SerEnergy.pdf>.
- [27] CRI, "global.geely.com," 2018. [Online]. Available: <http://global.geely.com/2017/11/28/renewable-methanol-cars-proven-to-be-a-major-success-iceland/>.
- [28] J. Stalpers, "www.deingenieur.nl," 2018. [Online]. Available: <https://www.deingenieur.nl/artikel/klimaatneutraal-schip-vaart-op-methanol>.
- [29] Maritime Knowledge Centre, TNO and TU Delft, Methanol as an alternative fuel for vessels, 2017.
- [30] Indian Ministry of Road Transport & Highways, Future of Fuel and Propulsion Technologies for Indian Railways, 2017.
- [31] Indian Ministry of Road Transport & Highways, Methanol Economy for India: Energy Security, Make in India and zero carbon foot print, 2017.
- [32] OK, Serenergy, HAMAG, Green Methanol Infrastructure - Energy Efficiency, 2017.
- [33] Leclanché, „Titanate industrial storage,” 2018. [Online]. Available: <http://www.leclanche.com/technology-products/products/titanate-racks/>.
- [34] Toshiba, "Brochures for the Toshiba SCiB," 2018. [Online]. Available: <http://www.scib.jp/en/download.htm>.
- [35] AllCell Technologies LLC, „A comparison of lead acid to Lithium-ion in stationary storage application,” 2012.
- [36] Department of Electrical and Computer Engineering, Technical University of Munich (TUM), „Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids,” 2017.
- [37] Altenergymag, 2018. [Online]. Available: <https://www.altenergymag.com/>.
- [38] G. Berckmans, "Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030," 2017.
- [39] Alstom, „Alstom confirms plans to bring hydrogen trains to the UK,” 2018. [Online]. Available: <http://www.alstom.com/press-centre/2018/05/alstom-confirms-plans-to-bring-hydrogen-trains-to-the-uk/>.

10 Bijlagen

Bijlage A Technische specificaties lithium Titanate Leclanché [33]



Technical specifications	
Rack specifications	
String format	19" triple rack
Battery modules in series	15
Battery voltage	510 – 810 V DC
Operational current (2C/2C)	180 A
Maximum current per string	300 A
Nominal capacity	63 kWh (C/10)
Specified number of cycles (1C/1C; 23°C; 100% DOD)	up to 15.000
Dimension (HxWxD)	2300 x 1800 x 600 mm
Weight	1800 kg
Temperature range	10°C up to 30°C
Module specifications	
Cells	Leclanché 936C08 Titanate
Architecture	60 cells; 3 parallel 20 serial
Capacity	4.200 Wh (C/10)
Nominal voltage	46 V
Voltage range	34,0 - 54,0 V
Nominal current (1C)	90 A
Maximum current	300 A
Cycles	15.000 (100% DoD at room temperature)
Temperature (operation)	+0°C to +40°C
Humidity	< 95 % (non condensing)
Dimensions (WxHxD)	463 x 356x 550 mm
Weight	99 kg
Protection class	IP20
Certification	CE, UN 38.3, IEC 61010

Tabel 30 Technische specificaties lithium Titanate Leclanché

Bijlage B Technische specificaties lithium SCiB Toshiba [34]

 SCiB™ cell		SCiB™ rechargeable cells can be categorized into two types: high energy and high power. The high energy type is used when a large capacity is required for electric automobiles, while the high power type is used when charge/discharge of a large current is required in stationary batteries, and others, a short time such as use of regenerative energy.	
	High energy type		 
	Product name	23Ah cell	10Ah cell
	Nominal capacity	23Ah	10Ah
	Nominal voltage	2.3V	2.4V
	Output performance	202Wh/L	1800W*(SOC50%, 10sec, 25°C)
	Input performance	176Wh/L	1500W*(SOC50%, 10sec, 25°C)
	Dimensions	W116xD22xH106 mm	
	Weight	Approx. 515g	
* This value is calculated from the internal resistance. @ 23Ah and 10Ah cell use part of technology achievement made by Japan's New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) subsidized projects. @ Specifications shown herein are not guaranteed values. These values are subject to change without notice. Performance depends on usage conditions.			

SCiB SCiB™ module This consists of more than one cell combined to obtain the required capacity and voltage. A cell monitoring unit (CMU) is mounted, and controller area network (CAN) communication. Additionally, the SIP series and five-series battery pack are equipped with a battery provides transmission of the voltage data and temperature data, management unit (BMU) and do not require an external protection circuit for use.																			
Photo		For industrial devices and stationary systems		For vehicle installation		For industrial devices and stationary systems For vehicle installation		Photo		BMU installation type		BMU installation type							
																			
						* Under development				*This product is only available for Japan.									
Product name		Type3-23		Type3-20		2P12S module		2P9S module		High power type		High energy type							
Model		FM01202CCB01A		FM01202CCA04A		AM01202CCA05A		AM00902CCA04A		—		—							
Nominal capacity		45Ah		40Ah		40Ah		10Ah		20Ah / 23Ah									
Nominal voltage		27.6V				27.6V		20.7V		21.6V		20.7V							
Voltage range		18.0 to 32.4V				18.0 to 32.4V		13.5 to 24.3V		16.2 to 25.2V		13.5 to 24.3V							
Ambient temperature		-30 to 45°C				-30 to 55°C				-30 to 55°C									
Ambient humidity		85%RH or less (no condensation)				95%RH or less (no condensation)				95%RH or less (no condensation)									
Max. charge/discharge current		160 A (continuous), 350 A (rush current)				120 A (continuous), 300 A (10 seconds)				—									
Dimensions		W190×D361×H125mm (Protrusions excluded)		W190×D360×H125mm		W165×D360×H125mm		W125×D223×H127mm		Dimensions		W140×D421×H62mm							
Weight		Approx. 15 kg		Approx. 14kg		Approx. 14kg		Approx. 11kg		Approx. 6kg		Weight		Approx. 4kg					
Major built-in functions		Cell voltage measurement, module temperature measurement, cell balancing*, communication (CAN) * Function to even differences in voltage among cells connected in series										Remarks		Charging by solar power generation (PV) is enabled.					
														Using one module		Using two units of [*1] in parallel		Using two units of [*2] in series	

 SciB™ system This is the stationary battery system widely used in home to social infrastructure applications, for the purpose of stable supply of electricity, backup, energy saving, and others. * These products are only available for Japan.											
Photo	Household use		Household use		Public/Industry use	Energy Management/ Public/Industry use	Photo	Public/Industry use	Public/Industry use	Public/Industry use	Energy Management/Public/ Industry use
											
System/Series	Single-phase system series					System/Series	Three-phase system series				
Model	ENG-B5048C1-N1	ENG-B5048C2-N1	ENG-B7430A4-N		SPCS-LIB010A	BEM003-10KT1	Model	IPCS-LIB-X100	IPCS-LIB-S250	IPCS-LIB-Z500	VPCS-LIB-R200
Output	At normal (Maximum): 4.8 kW At power outage: 1.5 kW		At normal: 3.0 kVA At power outage: 2.0 kVA		10kW	10kW	Output	10kW	25kW	50kW	20kW
Battery capacity	5.0kWh		7.4kWh		11~176kWh	9.9kWh	Battery capacity	15.4~46.2kWh	22~176kWh	66.9~356.8kWh	14.9kWh
Dealers	Toshiba Lighting & Technology Corporation				Toshiba IT & Control Systems Corporation		Dealers	Toshiba IT & Control Systems Corporation			

The reasons why “SCiB™” is chosen rather than lead-acid batteries or other lithium-ion



Safety

No emission of hydrogen gas
No need to have dedicated charging room

Lead-acid battery

Dedicated charging room is required considering the risk of fire.



Lead acid batteries has a risk of producing hydrogen gas..

SCiB™

There is no need to have dedicated charging room. You can also enjoy lower environmental impact and lower workload.



No emission of hydrogen gas
Environment-friendly thanks to lower emission of hazardous materials.

Highly safe LTO
There is **no risk** of lithium deposition

Conventional lithium-ion battery

Positive electrode (+)



SCiB™

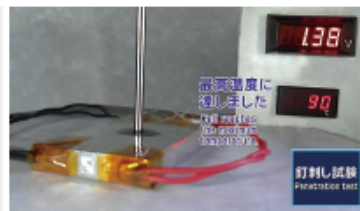
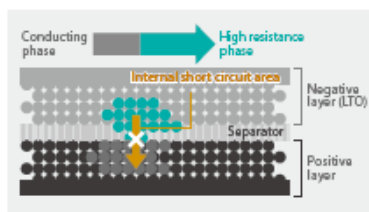
Positive electrode (+)



In case of conventional lithium-ion batteries, there is a risk of lithium metal deposition, which could break separator and cause internal short circuit when it is used for long period of time, under very cold temperature or with high charging current. There is no risk of lithium metal deposition in case of SCiB™.

Resistance of an internally-short-circuited area increases to reduce the short-circuit current.

Even in case of internal short circuit, there is lower risk of smoke or ignition on SCiB™ because it reduces short circuit current due to increase of resistance around internal short circuit area.



Compliance with safety standards

Organization	23Ah cell	SIP series
	- UL1642 - UL62133 - CAN/CSA-E62133	- UL62133 - CAN/CSA-E62133
	JIS C 8715-2	—

Protection function

The SIP series is equipped with BMU* which monitors voltage, current, temperature and others to protect the battery from abnormalities

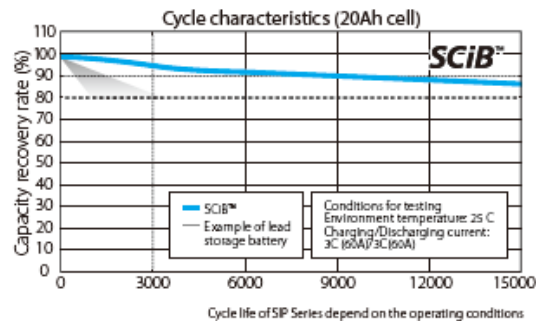
* BMU: Battery Management Unit



Long life

Continuous 15,000 cycles or more

According to Toshiba's actual measurement, less than 20 % of capacity degradation occurs even after more than 15,000 cycles of 60A charging and discharging.



Quick charging/discharging current

Charging completes within 1 hour

One eighth of a
lead-acid battery $\frac{1}{8}$



It takes 8 hours to charge a lead acid battery. On the other hand, SCiB™ reduces charging time significantly. With customized charger, 20 minutes charging becomes available.

The SIP series also can be used for **starting current** of a motor, etc



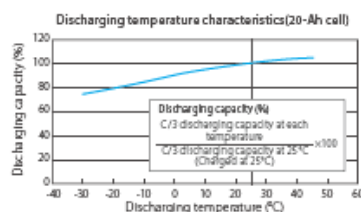
For starting a motor, the maximum current could be three times as large as the rated current. However, the SIP series can apply to a large current, up to 125A - 200 seconds*.

* A single unit of SIP24-23, SIP48-23: 125A - 200 seconds/Two units of SIP24-23 in parallel: 150A - 200 seconds



Resistance to low temperature

SCiB™ outputs **70% or higher** capacity even when the surrounding temperature is at **-30°C**



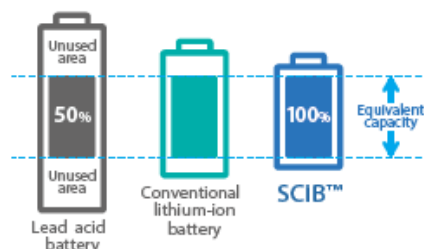
SCiB™ exhibits low degradation even when it is charged and discharged at -30°C

* Discharging capacity reaches 100% at 25°C



Using 100% of discharging depth(DOD)*

100% of DOD* is available



A lead-acid battery is ordinary used at approx. 50% of DOD in order to prevent degradation. However, SCiB™ is available at 100% of DOD.

* DOD: Depth of Discharge

Bijlage C Overzicht 'state of the art' batterijbussen

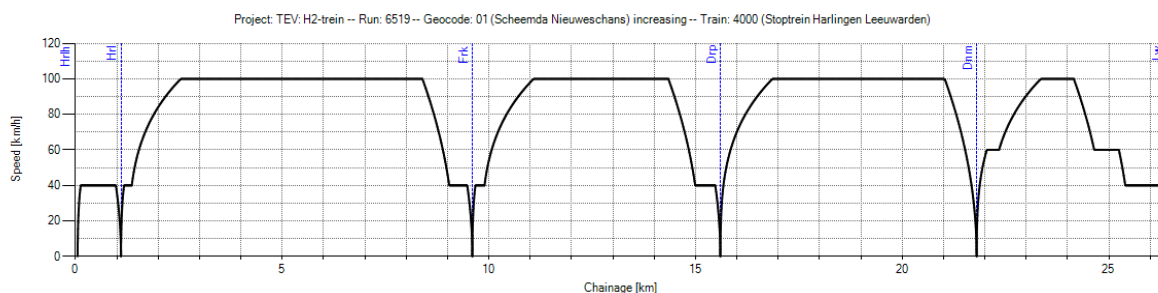
Table 1: Major e-bus manufacturers and their flagship models

OEM	Model	Length (meters)	Battery			Range (km)	Charging technology and duration	Units sold	Notes
			Size (kWh)	Type ²	Supplier				
Yutong	Yutong E12	12	295	LFP	CATL	320	Plug-in at depot, at 60kW or 150kW rate	35,000 in 2015-2016	Yutong provides the chargers as well.
BYD	18MLE	18	324	LFP	BYD	250	Pantograph and plug-in at a rate of 2x40kW	80 in Europe	5-year battery warranty
	Double decker	10.2-12	345	LFP	BYD	330	Plug-in at depot at a rate 2x40kW	20,500 in China for 2015-2016	
	12m (China)	12	324	LFP	BYD	250	Plug-in at depot at a rate 2x40kW		
	12m (overseas)	12	324	LFP	BYD	320	Plug-in at depot at a rate 2x40kW		
Zhongtong Bus	LCK6122E VG	12	230	LFP	China first brand	414	Plug-in at depot, 120kW	20,000 in 2015-2016	Not disclosed
Proterra	Catalyst FC	11-13	79-105	LTO	Toshiba	80-100	On route pantograph at maximum 500kW, plug-in at depot compatible with SAE J1772 CCS connector at 60-120kW, wireless charging	100	6-year battery warranty, 1 year or 50,000 miles for the bus
	Catalyst XR	11-13	220-330	NMC	LG Chem	220-310			
	Catalyst E2	11-13	440-660			405-560			
Solaris	Urbino 8.9	8.9	160	LFP/LTO	Solaris	200	Plug-in at depot or pantograph; at 80kW or 300kW; at 1.33kWh/min or 5kWh/min	5	Up to 10-year battery warranty
	Urbino 12	12	240			266	Plug-in at depot, pantograph or induction; at 80kW or 450kW or 200kW;	93	Not disclosed
	Urbino 18	18	240			185		5	
VDL Bus & Coach	Citea LLE-99	9.9	180	NMC	Multiple		Pantograph, Combo 2, up to 270kW; Depot charging by Heliex 40/80/100/120 kW, CCS; fast charging pantograph by Schunk 200-600kW or Siemens (inverted) 50/300/450kW; fast charging by ABB – inverted pantograph, CCS, 150/300/450kW	67	Not disclosed
	Citea SLF-120	12	63-240	LpTO, NMC	Multiple (Akasol, Durapower, Microvast)		Pantograph, Combo 2, up to 350kW		
	Citea SLF-180	18	63-180	NMC			Pantograph, Combo 2, up to 270kW		
Optare	Solo EV	9-10	138	LiFeMgP O4	Valence	270	Plug-in at depot, 42kW	56	5-year battery warranty
	Metrocity EV	10.8				205		13	
	Versa EV	10-11						13	
	Metrodecker	10.5	200		TBD		Plug-in at depot, 40kW	-	Announced model
BYD-ADL	Enviro 200EV	10.8-12	324	LFP	BYD	250	Plug-in at depot at 80kW rate, Mennekes, Type 2	51	Battery warranty differs by contract
Volvo Bus	Volvo 7900 Electric	12	76	LFP	SAFT	96	Opportunity charging, overhead, conductive, pantograph on pole (ABB OppCharge).	11	Not disclosed
	Volvo 7900 Electric Hybrid (PHEV)	12	19	LFP	SAFT	8.1	Opportunity charging, overhead, conductive, pantograph on pole (ABB OppCharge).	39	Not disclosed
Van Hool	Exqui.City 18m	18.6	215	LFP	BFFT	120	Plug-in and inverted pantograph; 80kW and 250kW	40	5-year battery warranty

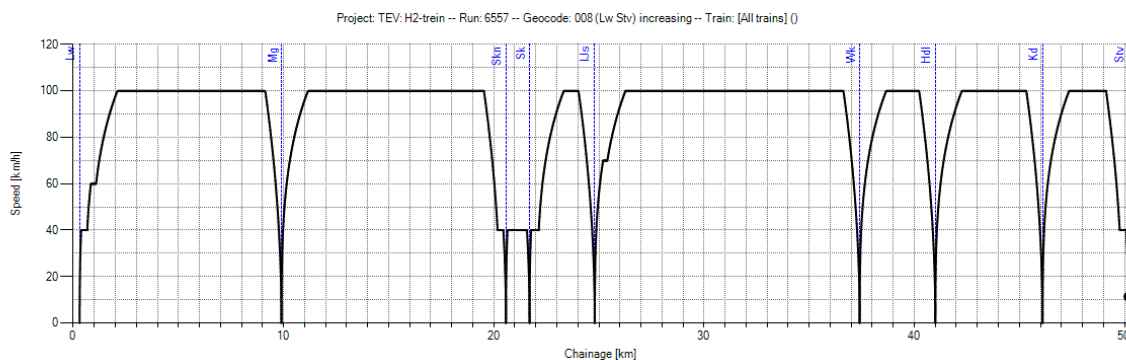
Bijlage D Simulatieresultaten

Snelheidsprofielen Xandra

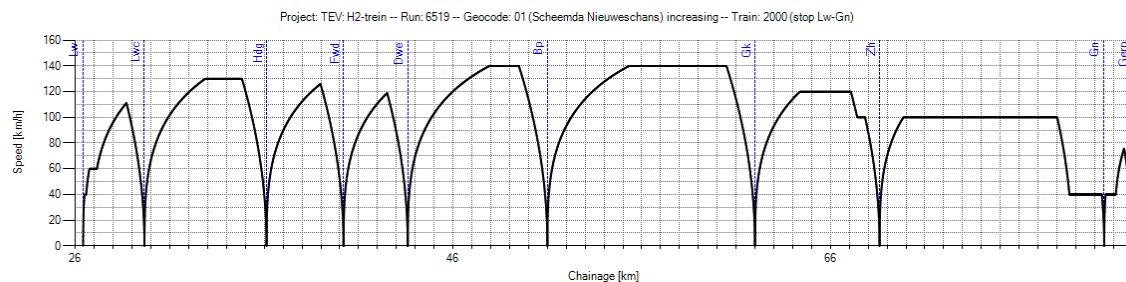
Harlingen - Leeuwarden



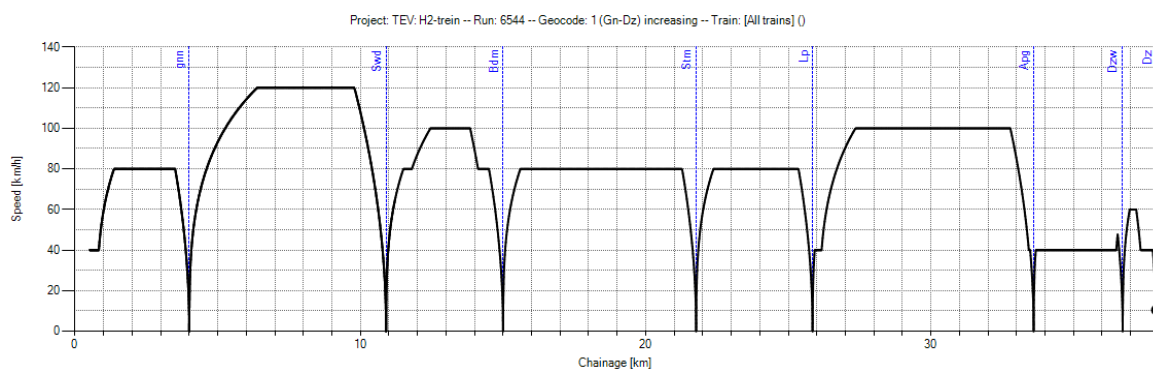
Leeuwarden - Stavoren



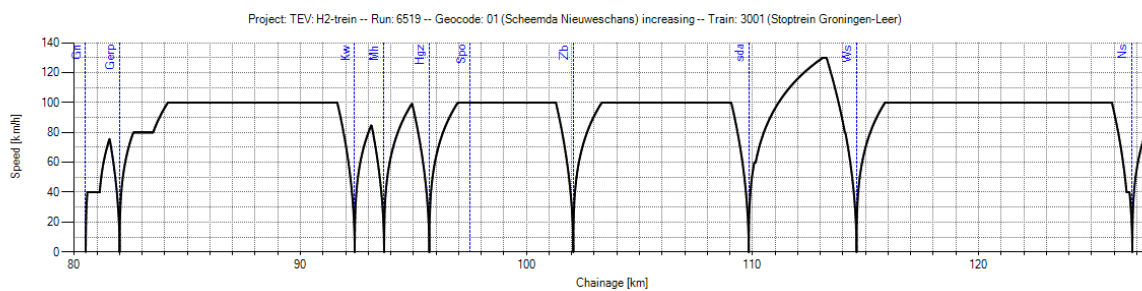
Leeuwarden - Groningen (stoptrein)



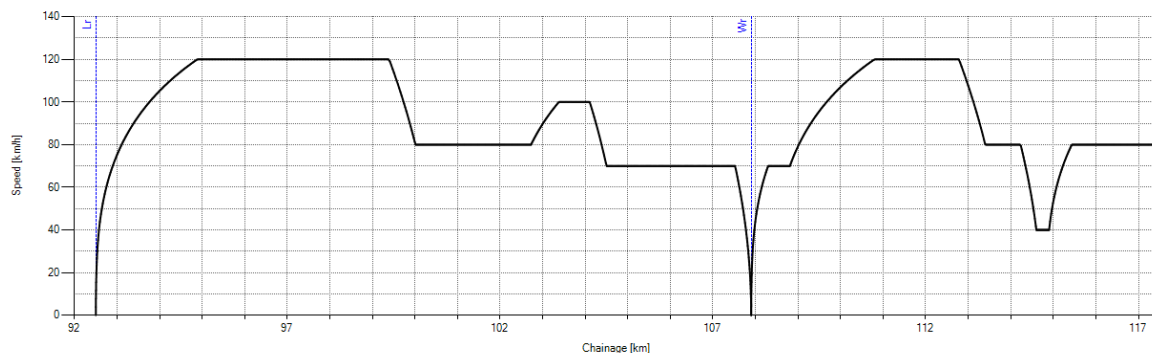
Groningen - Delfzijl



Groningen – Nieuweschans



Leer – Nieuweschans grens



Bijlage E Kostenraming batterijtrein met bovenleiding

Project:	Zero Emission Opportunity Charging
Document:	Kostenraming Zero Emission Opportunity Charging
Date:	14-9-2018
Version:	2.0
Status:	Definitief
Drafted by:	Reinier van Berge Henegouwen, Martijn Wolf
Verified by:	Niek Muller, Johan van de Werf



Investeringkosten	Hoeveelheid	eenheid	Prijs	Totaal
Opportunity charging station				
Laadlocatie 5 MW	18	stuk	1106000	19,908,000
				19,908,000
Bovenleidingsysteem				
Lengte trace bovenleiding dubbelsporing	15900	m1		
Leveren en aanbrengen van 1,5 kV onderstation	2	stuk	1000000	2,000,000
Leveren en aanbrengen 10 kV kabel, 2 stuks per tracé (gem 1km per station)	2000	m1	150	300,000
Leveren en aanbrengen bovenleiding, 1,5 kV, type B1, dubbel spoor, nacht	15900	m1	700	11,130,000
Verzwaren retour en retourverbindingen van tractie-stromen, dubbel spoor	15900	m1	10	159,000
Extra kosten voor bovenleiding t.p.v. overwegen	0	stuk	5000	-
				13,589,000
Bouwkosten				
Benoemde directe bouwkosten				33,497,000
Nader te detaileren bouwkosten	15%			5,024,550
Voorziene bouwkosten				
Vastgoedkosten	0			
Engineering kosten	15%			5,024,550
Overige bijkomende kosten (leges, heffingskosten, vervangend vervoer etc.)	1	stuk		3,500,000
Totale realistische kosten infrastructuur				47,046,100
Materieel kosten				
GTW 2/6: batterij- en ombouw- en engineeringkosten	14	stuk	722500	10,115,000
GTW 2/8: batterij- en ombouw- en engineeringkosten	40	stuk	817000	32,680,000
WINK: batterij- en ombouw- en engineeringkosten	18	stuk	722500	13,005,000
Vervanging batterijen GTW2/6	0	stuk	472500	-
Vervanging batterijen GTW2/8	0	stuk	567000	-
Vervanging batterijen WINK	0	stuk	472500	-
Overige bijkomende kosten (toelating en testbedrijf)				1,500,000
Totale investeringskosten materieel				57,300,000
Instandhouding kosten				
Instandhouding oplaadstations/jaar	18	Stuk	5000	90,000
Instandhoudingskosten bovenleiding+onderstations/jaar	15900	m1	25	397,500
Totale onderhoudskosten				487,500
Kosten windmolens				
Windmolen 3 MW	5	Stuk	5500000	27,500,000
Onderhoudskosten/jaar	5	Stuk	150000	750,000

Bijlage F Energiegebruik per traject

Traject	Afstand (km)	Batterijrein met opportunity charging								Waterstofrein							
		Worst Case		Normaal		Gunstig		Totaal		Worst Case		Normaal		Gunstig		Totaal	
		Verbruik kWh	kWh/km	Verbruik kWh	kWh/km	Verbruik kWh	kWh/km	kWh/week	kWh/jaar	Verbruik kg H2	kg/km	Verbruik kg H2	kg/km	Verbruik kg H2	kg/km	kg H2/week	kg H2/jaar
Leeuwarden - Stavoren	49,9	221	4,4	183,67	3,7	131,65	2,6	32.509	1.690.468	14,1	0,28	11,7	0,23	8,4	0,17	2.069	107.583
Stavoren - Leeuwarden	49,9	218	4,4	183,67	3,7	131,65	2,6	32.509	1.690.468	13,9	0,28	11,7	0,23	8,4	0,17	2.069	107.583
Leeuwarden - Harlingen Haven 1	26,35	120	4,6	97,08	3,7	68,90	2,6	22.184	1.153.544	7,6	0,29	6,2	0,23	4,4	0,17	1.412	73.412
Leeuwarden - Harlingen Haven 2	26,35	114	4,3	96,00	3,6	68,90	2,6	2.016	104.832	7,3	0,28	6,1	0,23	4,4	0,17	1.28	6.672
Harlingen Haven - Leeuwarden 1	26,35	124	4,7	98,08	3,7	68,49	2,6	22.412	1.165.426	7,9	0,30	6,2	0,24	4,4	0,17	1.426	74.169
Harlingen Haven - Leeuwarden 2	26,35	122	4,6	97,00	3,7	68,49	2,6	2.037	105.924	7,8	0,29	6,2	0,23	4,4	0,17	1.30	6.741
Sneek - Leeuwarden	21,4	91	4,3	73,00	3,4	51,89	2,4	10.877	565.604	5,8	0,27	4,6	0,22	3,3	0,15	692	35.995
Leeuwarden - Sneek	21,4	82	3,8	73,00	3,4	51,89	2,4	10.366	539.032	5,2	0,24	4,6	0,22	3,3	0,15	660	34.304
Groningen - Veendam	28,9	119	4,1	103,60	3,6	74,58	2,6	30.510	1.586.530	7,6	0,26	6,6	0,23	4,7	0,16	1.942	100.968
Veendam - Groningen	28,9	124	4,3	104,66	3,6	75,39	2,6	30.037	1.561.946	7,9	0,27	6,7	0,23	4,8	0,17	1.912	99.403
Groningen - Delfzijl	37,95	179	4,7	142,08	3,7	98,48	2,6	41.844	2.175.864	11,4	0,30	9,0	0,24	6,3	0,17	2.663	138.474
Delfzijl - Groningen	37,95	181	4,8	145,08	3,8	104,13	2,7	41.639	2.165.224	11,5	0,30	9,2	0,24	6,6	0,17	2.650	137.797
Groningen - Eemshaven	45,11	208	4,6	169,33	3,8	114,99	2,5	34.375	1.787.483	13,2	0,29	10,8	0,24	7,3	0,16	2.188	113.757
Eemshaven - Groningen	45,11	209	4,6	169,33	3,8	114,39	2,5	34.375	1.787.483	13,3	0,29	10,8	0,24	7,3	0,16	2.188	113.757
Roodeschol - Groningen	37,77	182	4,8	145,33	3,8	97,88	2,6	11.481	597.029	11,6	0,31	9,2	0,24	6,2	0,16	731	37.995
Groningen - Roodeschol	37,77	179	4,7	145,33	3,8	98,64	2,6	10.755	559.243	11,4	0,30	9,2	0,24	6,3	0,17	684	35.591
Groningen - Nieuweschans	46,3	201	4,3	187,75	4,1	139,43	3,0	8.261	429.572	12,8	0,28	11,9	0,26	8,9	0,19	526	27.338
Nieuweschans - Groningen	46,3	190	4,1	184,50	4,0	139,65	3,0	7.011	364.572	12,1	0,26	11,7	0,25	8,9	0,19	446	23.202
Leer - Groningen	72,13	331	4,6	275,75	3,8	207,73	2,9	38.881	2.021.799	21,1	0,29	17,5	0,24	13,2	0,18	2.474	128.669
Groningen - Leer	72,13	330	4,6	279,00	3,9	206,25	2,9	39.339	2.045.628	21,0	0,29	17,8	0,25	13,1	0,18	2.504	130.185
Winschoten - Groningen	34,1	151	4,4	138,92	4,1	107,39	3,1	11.808	614.012	9,6	0,28	8,8	0,26	6,8	0,20	751	39.076
Groningen - Winschoten	34,1	158	4,6	127,00	3,7	93,09	2,7	9.779	508.508	10,1	0,29	8,1	0,24	5,9	0,17	622	32.362
Groningen - Winschoten Snelrein	34,1	131	3,8	109,19	3,2	81,57	2,4	9.937	516.708	8,3	0,24	6,9	0,20	5,2	0,15	632	32.884
Winschoten - Groningen Snelrein	34,1	125	3,7	116,56	3,4	92,98	2,7	10.607	551.541	8,0	0,23	7,4	0,22	5,9	0,17	675	35.100
Leeuwarden - Groningen Europapark	55,6	277	5,0	224,42	4,0	171,60	3,1	66.652	3.465.891	17,6	0,32	14,3	0,26	10,9	0,20	4.242	220.572
Zuidhorn - Groningen Europapark	13,4	62	4,6	48,08	3,6	32,68	2,4	1.010	52.507	3,9	0,29	3,1	0,23	2,1	0,16	64	3.342
Groningen Europapark - Zuidhorn	13,4	60	4,5	49,25	3,7	33,23	2,5	1.034	53.781	3,8	0,28	3,1	0,23	2,1	0,16	66	3.423
Groningen Europapark - Leeuwarden	55,6	277	5,0	228,75	4,1	173,50	3,1	67.939	3.532.815	17,6	0,32	14,6	0,26	11,0	0,20	4.324	224.831
Leeuwarden - Groningen Europapark ST1	55,6	228	4,1	195,72	3,5	156,09	2,8	29.554	1.536.811	14,5	0,26	12,5	0,22	9,9	0,18	1.881	97.804
Leeuwarden - Groningen Europapark ST2	55,6	228	4,1	195,72	3,5	156,09	2,8	19.181	997.400	14,5	0,26	12,5	0,22	9,9	0,18	1.221	63.475
Groningen Europapark - Leeuwarden ST1	55,6	232	4,2	200,06	3,6	158,46	2,8	19.605	1.019.483	14,8	0,27	12,7	0,23	10,1	0,18	1.248	64.881
Groningen Europapark - Leeuwarden ST2	55,6	232	4,2	202,22	3,6	159,54	2,9	30.536	1.587.849	14,8	0,27	12,8	0,23	10,2	0,18	1.943	101.052
								741.057	38.534.977							47.161	2.452.396

Bijlage G Aanvullende analyse met NMC batterijen

Voor de aanvullende berekening met NMC batterijen zijn de volgende uitgangspunten, op basis van gegevens van de TU Eindhoven, gekozen:

- Het gekozen totaal batterijgewicht is hetzelfde als bij de oplossing met LTO batterijen;
- De energiedichtheid voor de NCM batterij is 200 Wh/kg;
- De C-rate is twee;
- De prijs is 250 Euro/kWh;
- Bij 5000 cycli is de capaciteit nog 80%.

Hiermee neemt de totale batterijcapaciteit in de trein toe van 525 kWh voor LTO naar 1910 kWh voor NMC.

Met bovenstaande gegevens is opnieuw een energieberekening uitgevoerd. Daaruit volgt dat een groot aantal laadstations, nodig bij gebruik LTO batterijen, niet nodig is bij toepassing van NCM batterijen. Alle stations kunnen vervallen behalve de volgende:

- Bij Groningen en Leeuwarden: totaal twee x vier zware laadstations (7.4 MW);
- Bij Groningen Europapark twee zware laadstations (7.4 MW);
- Bij Leer één licht laadstation (1.9 MW), aangezien de laadtijd daar lang is.

De realisatie van de hoge laadvermogens bij Groningen en Leeuwarden zijn voor de batterijen haalbaar maar er zijn nog wel een aantal risico's voor het laden bij stilstand en ook bij rijden:

- Belasting profiel onderstations: Het vermogen dat de onderstations in Groningen en Leeuwarden moeten leveren zal langer hoog zijn dan bij de meeste onderstations in NL op dit moment het geval is. Dit komt omdat de treinen op één plek bij elkaar komen en op deze plek al de energie moeten opnemen. Met deze manier van belasten is op dit moment geen ervaring in de railinfra. Mogelijke oplossingen hiervoor zijn meer onderstations plaatsen. Om de netbelasting meer over de dag uit te smeren kan gebruik worden gemaakt van energieopslag naast het spoor.
- Te leveren vermogen bij stilstand: Bij stilstand moet een zeer hoog vermogen naar de trein worden overgebracht. Bij de huidige stroomafnemers is de opgenomen stroom bij stilstand beperkt tot 300 á 400A. Ook voor de oplossing met LTO batterijen moet dit verder worden uitgezocht, bijvoorbeeld via een stroomrail zoals in Figuur 5. Echter met NCM batterijen is de gevraagde stroom aanzienlijk, wat extra risico's met zich mee brengt. Mogelijke oplossingen hiervoor zijn hogere spanningen en/of meerdere stroomafnemers of sleepstukken. Dit dient bij detailengineering verder uitgezocht te worden.
- Te leveren vermogen bij rijden: hiervoor is waarschijnlijk een zware stroomafnemer noodzakelijk. Een stroomafnemer zoals geplaatst op een locomotief zou in principe hiervoor geschikt zijn. Een lichtere stroomafnemer met hogere spanning is ook een mogelijke oplossing hiervoor. Dit dient bij detailengineering verder uitgezocht te worden.
- Brandveiligheid

Doordat de treinen een veel hogere batterijcapaciteit krijgen dan bij toepassing van LTO batterijen, zal het aantal cycli van laden/ ontladen nu lager zijn gedurende de 15 jaar inzet van de GTW. Hiermee is het maximum aantal cycli van 5000 toch voldoende om zonder batterijwissel de 15 jaar te halen.

Met bovenstaande gegevens kan een indicatie gegeven worden in de kostenreductie bij toepassing van NCM batterijen:

- De kosten voor aanpassing materieel komen op € 57.7 miljoen.
- De kosten voor oplaadstations kunnen dalen van € 25.9 miljoen naar € 21.7 miljoen. Hierbij is aangenomen dat de prijs voor een zwaar oplaadstation 20% duurder is dan een standaard oplaadstation. Dit moet verder worden uitgewerkt in detailengineering.

Deze analyse laat zien dat ook NCM batterijen interessant genoeg zijn om in een vervolgstudie mee te nemen.