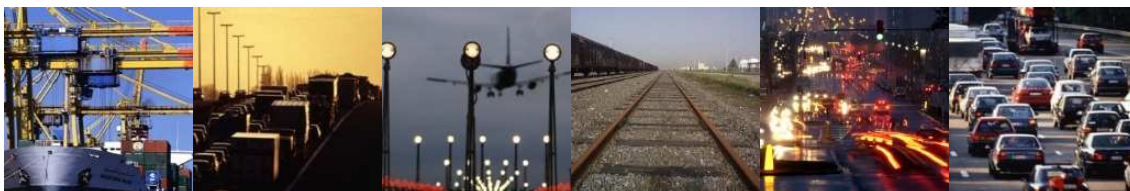


Elektrificatie van het Belgische spoorwagennet of het gebruik van andere duurzame vervoerswijzen om de dieseltractie te vervangen

Rapport voor: FOD Mobiliteit en Vervoer

Datum: 11/12/2020

Auteurs: Christophe Heyndrickx, Sebastiaan Boschmans



Transport & Mobility Leuven
Diestsesteenweg 57
3010 Leuven
Belgium
<http://www.tmlleuven.be>

Inhoud

Inhoud.....	2
1 Introductie.....	8
2 Gelijkaardige projecten.....	9
2.1 Groningen en Fryslan	9
2.2 Rail Gent-Terneuzen.....	11
2.3 Alternatieven voor dieseltreinen in Rheinland-Pfalz Sud.....	13
2.4 VDE studie.....	15
2.5 Franse studie vergroening transport via spoor	18
3 Treintypes.....	20
3.1 Klassieke dieselstellen	20
3.2 Elektrische treinstellen.....	21
3.3 Elektrische treinen met pantograaf en batterij.....	22
3.4 Waterstoffreinen	25
4 Methodologie.....	30
5 Keuze kentallen voor studie.....	32
5.1 Materieelkosten	32
5.2 Infrastructuurkost.....	32
5.3 Energiekosten.....	33
5.4 Onderhoudskosten materieel.....	33
5.5 Overzicht.....	34
5.6 Emissies.....	34
6 Theoretische benadering.....	39
7 Oplossingen voor goederenvervoer.....	43
8 Overzicht van te elektrificeren lijnen.....	47
8.1 Situering.....	47
8.2 Overzicht kosten.....	54

9	Quickscan lijn Genk-Bilzen.....	57
10	Quickscan lijn 204 & 55.....	60
	10.1 Goederenvervoer.....	60
	10.2 Personenvervoer.....	62
11	Evaluatie te elektrificeren lijnen (zonder goederenlijnen L21C, L204 en L55).....	64
	11.1 Projectalternatieven.....	64
	11.2 Resultaten.....	65
12	Sensitiviteitsanalyse.....	70
	12.1 Opzet van de sensitiviteitsanalyse.....	70
	12.2 Minimum en maximum van elk scenario.....	71
	12.3 Parameter analyse.....	71
	12.4 Monte-Carlo analyse.....	78
13	Conclusies.....	82
14	Referenties.....	86

Lijst figuren

Figuur 1: Inschatting terugdientijd in functie van jaarlijkse voertuigbewegingen - bron: Lloyd's Register Rail (2015).....	9
Figuur 2: Overzicht van kosten waterstoftechnologie in studie Arcadis-Riccardo Rail (2018)	10
Figuur 3: Overzicht kosten waterstoftechnologie - Ombouw versus Nieuw - Arcadis-Riccardo Rail (2018).....	11
Figuur 4: Gebruikte kengetallen in Goudappel-Coffeng (2018) studie - exploitatie NMBS.....	12
Figuur 5: Gebruikte kengetallen in Goudappel-Coffeng (2018) studie – alternatieve exploitatie	12
Figuur 6: Vergelijking totale operatorkosten onder verschillende exploitatie - Goudappel-Coffeng (2018) in miljoen euro voor verschillende varianten.....	13
Figuur 7: Overzicht van totale kosten in het totale 'Pifaznet' bij verschillende opties (van links naar rechts: Diesel, Batterijtrein, Dieselelektrisch, Diesel-batterij, Waterstof). Overzicht bij een horizon van 35 jaar.....	14

Figuur 8: Kentallen gebruikt in de VDE studie, DMU = dieseltechnologie, EMU=elektrisch, BEMU=batterij-elektrisch, HEMU=waterstof. Opmerking: tkm staat in deze tabel voor trainkilometer	16
Figuur 9: Overzicht van de verschillende netto huidige waardes van de investeringen van de respectievelijke technologieën	17
Figuur 10: Overzicht van mogelijke locaties voor de ingebruikname van waterstoftreinen	19
Figuur 11: MW 41 dieseltrein (links), Corradia Lint 41/H in uitbating van Veolia (rechts)	20
Figuur 12: MR08 of Desiro in gebruik bij NMBS.....	21
Figuur 13: Desiro Cityjet Eco - OBB exploitatie met technische details	23
Figuur 14: Mireo Plus B en Plus H.....	24
Figuur 15: Bombardier Talent 3 (BEMU) links en Stadler Flirt Akku (rechts)	24
Figuur 16: Schematische voorstelling van de aandrijflijn van een waterstoftrein	27
Figuur 17: Coradia iLint.....	27
Figuur 18: a) Vergelijking kosten iLint met MW41 en elektrisch (EMU) en batterij-elektrisch alternatief (BEMU). Bron: Alstom (links) b) Total Cost of Ownership (totale gebruikskost) vergelijking van waterstoftrein (FCE/FCH) met dieseltrein in huidige en toekomstige omstandigheden - Bron: Roland Berger, 2017 (rechts)	28
Figuur 19: TCO (Total Cost of Ownership) berekeningen uit Roland Berger (2019) - applicatie op passagierstreinen	29
Figuur 20: Alternatieve opties vergeleken met directe elektrische trein: eigen bewerking van Cebon D. (2020) en Hofrichter A. et al (2012).....	35
Figuur 21: Operationele kost per type technologie – theoretische benadering.....	39
Figuur 22: Totale kosten voor het aanleggen van sporen (totale kost, inclusief aanleggen bovenleiding) in verschillende deelgebieden, Bron: Baumgartner J.P (2001).....	40
Figuur 23 Eenvoudige voorstelling van het ideale traject voor batterijtreinen.....	41
Figuur 24: Totale kost per technologie voor het gebruik van een treinstel bestaande uit 3 elementen op een traject van 20 kilometer, in functie van frequentie (treinen per uur = TPH), Bron: Network Rail, Traction Decarbonisation Strategy	42
Figuur 25: Be-Hydro hybride diesel/waterstof motor - Bron: BeHydro/Anglo Belgian Corporation & CMB	44
Figuur 26: Overzicht van niet-geëlektrificeerde lijnen rond Gent.....	47
Figuur 27: Overzicht Charleroi-Couvin.....	51
Figuur 28: L21 C Genk-Bilzen + Bocht L21A.....	53

Figuur 29: Financiële NPV investeringsscenario's spoor.....	65
Figuur 30: Totale maatschappelijke baat (Planbureau waarderingen)	67
Figuur 31: Maatschappelijke baat per case (Planbureau waarderingen).....	68
Figuur 32: Totale maatschappelijke baat (CE Delft waarderingen).....	68
Figuur 33: Maatschappelijke baat per case (CE Delft waarderingen)	69
Figuur 34: Voorbeeld sensitiviteitsanalyse onderhoudskost waterstof	72
Figuur 35: Sensitiviteitsanalyse onderhoudskosten per technologie. Horizontale (x-as): onderhoudskosten in €/voertuigkm. Verticale as (y-as): totale maatschappelijke NPV of ENPV in miljoen euro.....	73
Figuur 36: Sensitiviteitsanalyse energiekosten per technologie. Horizontale (x-as): energiekosten in €/voertuigkm. Verticale as (y-as): totale maatschappelijke NPV of ENPV in miljoen euro.	73
Figuur 37: Sensitiviteitsanalyse aanschafkosten per technologie. Horizontale (x-as): kost per treinstel in Miljoen €. Verticale as (y-as): totale maatschappelijke NPV of ENPV in miljoen euro.....	74
Figuur 38: Sensitiviteitsanalyse aanschafkosten per technologie. Horizontale (x-as): kost per treinstel in Miljoen €. Verticale as (y-as): totale maatschappelijke NPV of ENPV in miljoen euro.....	75
Figuur 39: Sensitiviteitsanalyse van de grootte van de stock. Horizontale (x-as): additioneel aantal treinen in %. Verticale as (y-as): totale maatschappelijke NPV of ENPV in miljoen euro.	75
Figuur 40: Impact kleinere reservestock bij volledige elektrificatie. Horizontale (x-as): additioneel aantal treinen in %. Verticale as (y-as): totale maatschappelijke NPV of ENPV in miljoen euro.....	76
Figuur 41: Combinatie van lage energiekost en lage onderhoudskost bij waterstoffrein ('ideale' situatie) x-as: onderhoudskosten in €/vkm, y-as: Maatschappelijke baat (ENPV) in miljoen €.....	77
Figuur 42: Impact lagere discontovoet op ENPV - lage emissiewaardering.....	77
Figuur 43: Impact lagere discontovoet - hoge emissiewaardering.....	78
Figuur 44: Sensitiviteitsanalyse met lage waarderingen - Monte Carlo	79
Figuur 45: Sensitiviteitsanalyse met hoge waarderingen - Monte Carlo	80
Figuur 46: Resultaten Monte Carlo analyse per lijn – op y-as: ENPV in Miljoen euro.....	81

Lijst tabellen

Tabel 1: Verificatie van de investeringskost in waterstof.....	11
--	----

Tabel 2: kostenspecificatie van de MR/MS 08/‘Desiro’, herrekening naar een 2-ledig voertuig, bron: NMBS.....	21
Tabel 3: Oplaadcapaciteit batterij - theoretisch voorbeeld-eigen uitwerking op basis van Siemens .	23
Tabel 4: Vergelijking technische specificaties treintypes op batterij (BEMU).....	25
Tabel 5: Bruikbare capaciteit batterij en effectief operationeel bereik:.....	25
Tabel 6: Te onderzoeken elementen / mogelijke impacts van de verschillende opties	30
Tabel 7: Overzicht kentallen materieel en infrastructuur.....	34
Tabel 8: Overzichtstabel infrastructuurkosten.....	34
Tabel 9: Indirecte emissie in equivalent CO2 van diesel, elektrische trein en alternatieven.....	36
Tabel 10: Lokale emissies - SOx, NOx en PM – eigen berekening.....	36
Tabel 11: Waarderingen emissies, Bron Planbureau (2012) en CE Delft (2019)	36
Tabel 12: Totale emissiekost MW41 in €/l en €/vkm.....	37
Tabel 13: Totale emissiekost nieuwe dieseltrein in €/l en €/vkm	37
Tabel 14: Indirecte CO2 emissies en emissiekost in €/vkm voor waterstof en elektrische varianten	37
Tabel 15: Emissies in g/kWh voor MW41 en HLD77 treintypes -Bron: EMMOSS emissie model	46
Tabel 16: Potentiele emissiebaton door gebruik waterstof in HLD77.....	46
Tabel 17: Waterstofcapaciteit en aantal benodigde passages per dag ter bevoorrading van waterstoffreinen per voertuigcategorie en opslagvorm	50
Tabel 18: Private kost per categorie.....	50
Tabel 19: Externe kost per categorie	50
Tabel 20: Geschatte infrastructuurinvesteringen in Miljoen €	55
Tabel 21: Overzicht van investering in treinstellen - per lijn/cluster.....	55
Tabel 22: Kentallen goederenvervoer- Bron: Infrabel / MIRA (Delhaye et al, 2017)	57
Tabel 23: Karakteristieken lijn – Bron: Infrabel	57
Tabel 24: Inschatting reistijdbaten – Bron: eigen berekeningen.....	58
Tabel 25: Emissies dieseltreinen op deeltraject.....	58
Tabel 26: Maatschappelijke NPV in Miljoen € over 30 jaar, discontovoet gelijk aan 4%.....	59
Tabel 27 kentallen per spoorlijn, Bron: TML berekeningen op basis van Infrabel	60

Tabel 28: Emissies goederentrein diesel en waarderingen in €/ton	61
Tabel 29: Onderbouwing tonkilometers, bron: Infrabel	61
Tabel 30: NPV (in miljoen €) voor goederenlijn L204 en L55.....	62
Tabel 31: Sensitiviteitsanalyse L204 en L55	62
Tabel 32: Overzicht kosten	65
Tabel 33: Jaarlijkse emissies en waardering emissiekosten.....	66
Tabel 34: Volledige NPV in miljoen euro voor alle lijnen lage emissiewaardering (FPB).....	67
Tabel 35: Volledige NPV in miljoen euro voor alle lijnen hoge emissie waardering (CE Delft).....	69
Tabel 36: Sensitiviteitsanalyse - boven en ondergrenzen van de voornaamste kentallen	70
Tabel 37: Best case en worst case scenario met verschillende emissiewaarderingen (ENPV in Mln € tov het Nul scenario).....	71

1 Introductie

Transport via spoorwegen leidt tot veel lagere emissies van broeikasgassen en andere pollutanten dan vergelijkbaar transport via de weg, binnenvaart of lucht (EEA, 2017¹). Dit voordeel is nog prominenter indien de spoorlijnen geëlektrificeerd zijn. In België (en binnen Europa) is vervoer via spoor de enige transportmodus die hoofdzakelijk elektrisch wordt aangedreven. De verdere ontwikkeling van het vervoer via spoor in België is een essentieel onderdeel van het Energie-Klimaatplan 2021-2030.

Het doel van deze studie is om een kosten-baten analyse uit te voeren naar het verder verduurzamen van het spoorvervoer, door het verder afbouwen van de niet-geëlektrificeerde delen van het spoornetwerk.

Hierbij wordt gekeken naar 3 opties:

- 1) volledige elektrificatie van het Belgische spoornetwerk, met enkel nog gebruik van elektrische treinen
- 2) gebruik van waterstoffreinen als vervanging van dieseltreinen op niet-geëlektrificeerde delen (deze treinen worden al in Duitsland en binnenkort in Nederland ingezet)
- 3) het gebruik van hybride treinen met batterij en pantograaf (voorbeeld: de Flirtino treinen die in Noord-Nederland zullen worden gebruikt)

Het aantal lijnen waar nog actief met dieseltreinen wordt gewerkt is beperkt. In deze studie bekijken we ten minste²:

- Lijn 82: Aalst-Burst
- Lijnen 132-134: Couvin – Charleroi
- Lijn 21c: Bilzen-Genk Goederen
- Een groter aantal lijnen rond Gent
 - Lijn 55: Evergem-Grenspunt met Nederland naar Terneuzen
 - Lijn 58: Eeklo-Gent Dampoort
 - Lijn 86: Ronse – De Pinte
 - Lijn 122: Geraardsbergen - Melle
 - Lijn 204: Gent Dampoort-Gent Noord

¹ <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/energy-efficiency-and-specific-co2-emissions/energy-efficiency-and-specific-co2-9>

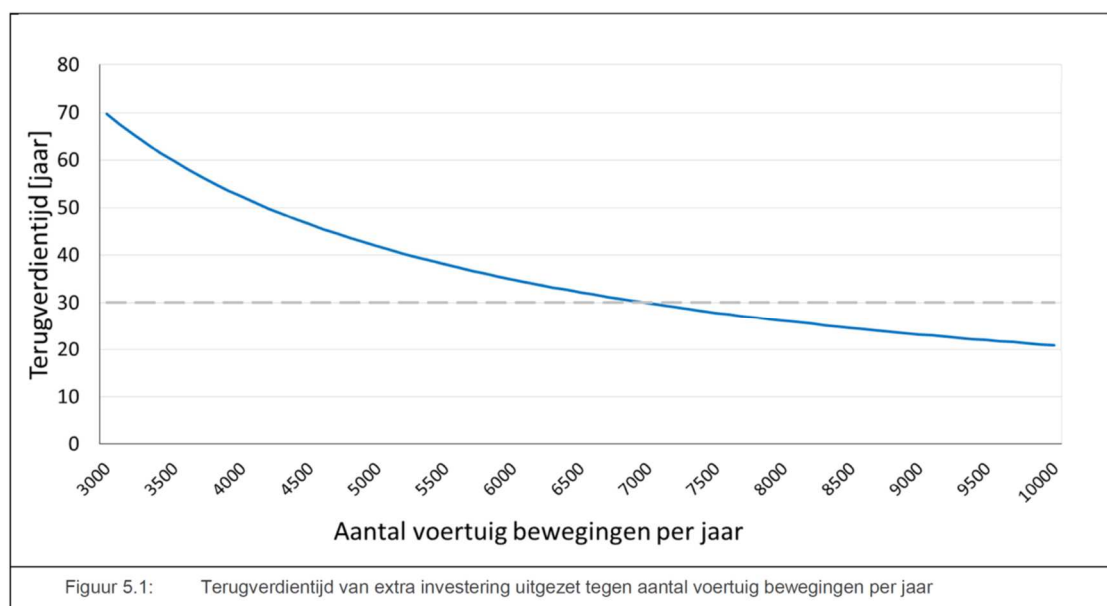
² Het bestek verwees expliciet naar deze lijnen. Op de lijn Antwerpen-Hamont/Hasselt wordt nu nog gemengd gereden met een dieseltreinstel in combinatie voor het stuk Mol – Hasselt/Hamont.

2 Gelijkaardige projecten

2.1 Groningen en Fryslan

De provincies Groningen en Fryslan hebben nog een groot aantal niet-geëlektrificeerde lijnen. De huidige uitbating van deze lijnen wordt door Arriva verzekerd met treinstellen van het type GTW van de Zwitserse fabrikant Stadler rail. Het gaat om dieselektrische treinstellen (in tegenstelling tot de dieselhydraulische stellen zoals de MW 41 van de NMBS) die in Nederland ook gekend zijn als Spurt. De treinstellen werden in 2005 aangekocht in een set van 43 treinstellen, met een uitbreiding van 8 treinstellen in 2008. De treinstellen bedienen een cluster van 11 lijnen rond Leewarden en Groningen. De lengte van het niet-geëlektrificeerde net rond Groningen bedraagt ongeveer 250 kilometer.

In 2015 bestelden de provincies een studie naar de elektrificatie van deze lijnen, met het oog op verdere decarbonisatie van het spoorvervoer. Deze studie was vergelijkbaar in opzet met de huidige studie en bekeek eveneens de mogelijkheden van ‘gewone elektrificatie’, ‘zero-emissie treinen met opportunity charging’ en een variant met waterstoffreinen. Andere opties worden kort besproken, ondermeer inductieve voeding en LNG. De resultaten van de studie werden samengevat in Ricardo (2016) ‘elektrificatie van Noordelijke diesellijnen’ en Arcadis (2018) ‘Haalbaarheidsstudie zero emissie treinen met opportunity charging’



Figuur 1: Inschatting terugverdientijd in functie van jaarlijkse voertuigbewegingen - bron: Lloyd's Register Rail (2015)

Uit de studie naar elektrificatie bleek dat de investering (ook gedeeltelijk) in de spoorlijn uit bedrijfseconomisch standpunt niet gunstig was. Dit kwam voornamelijk door de hoge investeringskosten en strikte opstelling in regelgeving van de infrastructuurbeheerder (ProRail). Kosten voor het elektrificeren van de infrastructuur lagen in sommige cases hoger dan 3 miljoen euro per voorziene kilometer (dubbelspoor inclusief rangeerstations). Hoewel alternatieven bekeken worden tot versobering van de infrastructuur, leidt dit niet tot een gewenste positieve bedrijfscase. Voor de totale investering was de verwachte kost tussen 477 en 690 miljoen euro. Terugverdientijden van de investeringen lagen voor sommige lijnen hoger dan 70 jaar. Naast de hoge infrastructuurkost

speelt ook het relatief geringe aantal voertuigbewegingen tegen de bedrijfscase voor elektrificatie. De meeste van deze lijnen hebben minder dan 3500 voertuigbewegingen per jaar. Wat ook meespeelt in de negatieve bedrijfscase is dat de Spurt/GTW treinen kleiner zijn en een lager vermogen hebben dan bijvoorbeeld de MW 41 treinen, daardoor hebben ze ook een lager energieverbruik (0.8 l diesel / km versus 1.4 tot 1.6 l/km voor MW 41). Indirect maakt dit de mogelijke energiebesparingen en reductie van emissies minder groot.

Een consortium van Arcadis en Riccardo (2018) bekeek in een opvolgstudie de haalbaarheid van een batterijtrein, in combinatie met partiële elektrificatie. De optie waterstoftrein werd ook als alternatief meegenomen. De optie ‘waterstoftrein’ bleek in deze studie ten minste dubbel zo duur als een variant met batterijtrein, zijnde 322 miljoen euro versus 150 miljoen euro voor batterijtrein. Dit was enkel voor de ombouw van de bestaande GTW stellen. Bij de aankoop van nieuwe treinstellen met waterstof (gebaseerd op de Coralia iLint van Alstom) werd de totale kost geraamd op 532 miljoen euro. In vergelijking met de elektrificatie van de infrastructuur (zie hierboven) concludeerde Arcadis dat de partiële elektrificatie met investeringen in batterijtreinen mogelijk een opportune zet was. Dit kon door ombouw van bestaande GTW stellen met een (op het dak gemonteerde) batterij van 525 kWh of 630 kWh. De studie was desalniettemin geen volledige MKBA. Er werd geen rekening gehouden met energiekosten of emissies. Enkel investeringen werden in kaart gebracht.

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	1,4 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

Figuur 2: Overzicht van kosten waterstoftechnologie in studie Arcadis-Riccardo Rail (2018)

	Ombouw	Nieuw
Investering materieel	€ 108.000.000	€ 324.000.000
	€ 7.500.000	€ 1.500.000
Totaal	€ 115.500.000	€ 325.500.000
Investering infra	€ 18.000.000	€ 18.000.000
	€ 1.650.000	€ 1.650.000
Totaal	€ 19.650.000	€ 19.650.000
Investering energievoorziening	€ 21.000.000	€ 21.000.000
	€ 110.000.000	€ 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

Figuur 3: Overzicht kosten waterstoftechnologie - Ombouw versus Nieuw - Arcadis-Riccardo Rail (2018)

Gebruiken we de cijfers uit Figuur 3 dan komen we tot de volgende conclusie voor de prijs van waterstof uit hernieuwbare (wind)energie.

Tabel 1: Verificatie van de investeringskost in waterstof

	Investering	Onderhoud (jaar)
Waterstoftankstations (2 tankstations) (Mln. €)	20	0.05
Electrolyzers (Mln. €)	25	0.75
Windmolens (Mln. €)	110	3
Totale kost (niet verdisconteerd) (Mln. €)	155	3.8

	Hoog	Laag
Productie/jaar (miljoen kg)	3.00	
Levensduur (jaar)	10	15
Totaal productie (miljoen kg)	30.00	45.00
Kosten H2 (€/kg)	6.43	4.71

Hoewel uit de bovenstaande studie in 2018 werd geconcludeerd dat de beste optie voor verduurzaming in batterijtreinen lag, werd het plan in 2019 in allereil afgevoerd. Uit communicatie rond deze beslissing vanuit de provincie, bleek de studie uit 2018 onvoldoende rekening te houden met de beperkingen van de batterijen. Deze zouden moeten geladen worden aan een netspanning van 750 V, terwijl de netspanning in Nederland gebruikelijk 1.5 kV is. Ter vergelijking, in België is de gebruikelijke netspanning 3 kV. Deze beperking bleek een te grote aanpassing van het net te vergen, waardoor de batterijtrein niet meer mogelijk werd geacht. In 2020 worden de eerste tests met de Coradia iLint waterstof trein uitgevoerd in Groningen. Hierbij speelt ook mee dat de provincie Groningen plant om een zogenaamde industriële ‘gascluster’ voor waterstofproductie uit te bouwen.

2.2 Rail Gent-Terneuzen

North Sea Port ontstond uit een fusie van de Nederlandse havens Terneuzen en Vlissingen met de haven van Gent. In en rond de haven is er veel goederenspoor, maar momenteel nog geen personenvervoer. In 2018 voerde Goudappel-Coffeng een onderzoek uit naar de haalbaarheid van personenvervoer via het spoor. Er werden 6 reizigersvarianten uitgewerkt. Naast NMBS exploitatie

werden ook alternatieve exploitatiemogelijkheden onderzocht. Deze varianten houden ook rekening met het gebruik van nieuwe dieseltreinen, elektrische treinen, waterstof en batterijtreinen.

Kostencomponent	Diesel	Elektrisch	Bron
Personeelskosten per treinkilometer	€ 5,80 (treinbestuurder + treinbegeleider)	€ 5,80 (treinbestuurder + treinbegeleider)	Opgave NMBS
Stukprijs materieel	€ 5,25 mln. ¹³	€ 4,6 mln. ¹⁴	Opgave NMBS
Jaarlijkse materieelkosten (X maal de stukprijs)	0,095	0,095	Ricardo Rail (Verkenning elektrificatie Noordelijke Diesellijnen)
Verzekering	5% over aanschafprijs	5% over aanschafprijs	Ervaringscijfers
Energiekosten per treinstelkilometer	€ 1,30	€ 1,30	Opgave NMBS
Onderhoudskosten per treinstelkilometer	€ 2,40	€ 1,82	Opgave NMBS
Beheer en winst (% over kosten personeel, materieel, energie en onderhoud)	30%	30%	CVS 2008 (Toekomst van de stoptrein op het hoofdrailnet)
Gebruiksvergoeding binnen België (gemiddeld per treinkilometer)	€ 5,98	€ 5,98	Opgave NMBS
Gebruiksvergoeding binnen Nederland	Cf. Netverklaring 2017	Cf. Netverklaring 2017	ProRail (Netverklaring 2017)

Tabel 9.2: Gehanteerde kengetallen voor traditionele diesel- en elektrische exploitatie.

Figuur 4: Gebruikte kengetallen in Goudappel-Coffeng (2018) studie - exploitatie NMBS

De studie van Goudappel-Coffeng herhaalt een gelijkaardige afweging als in deze studie. De exploitatiekosten werden afgestemd met de NMBS. De prijs voor dieseltreinen is berekend als de stukprijs voor de MW41 (3.5 miljoen euro), maar dan in een eigen herrekening omgezet naar de kost van een driedelig treinstel. De prijs voor de elektrische treinen werd bepaald aan de hand van de AM08. Daarnaast wordt alternatieve exploitatie onderzocht. Dit geeft andere kengetallen dan deze voor de NMBS

Kostencomponent	Diesel	Elektrisch	Hybride	Waterstof
Gemiddelde personeelskosten per fte	€ 75.000	€ 75.000	€ 75.000	€ 75.000
Stukprijs materieel	€ 7,2 mln.	€ 6,1 mln.	€ 6,4 mln.	€ 7,2 mln.
Jaarlijkse materieelkosten (X maal de stukprijs)	0,095	0,095	0,095	0,095
Verzekering	5% over aanschafprijs	5% over aanschafprijs	5% over aanschafprijs	5% over aanschafprijs
Energiekosten per treinstelkilometer	€ 1,28	€ 0,37	€ 0,40	€ 1,56
Onderhoudskosten per treinstelkilometer	€ 0,91	€ 0,69	€ 0,85	€ 0,91
Beheer en winst (% over kosten personeel, materieel, energie en onderhoud)	30%	30%	30%	30%
Gebruiksvergoeding binnen België (gemiddeld per treinkilometer)	€ 5,98 + 5 euro per haltering	€ 5,98 + 5 euro per haltering	€ 5,98 + 5 euro per haltering	€ 5,98 + 5 euro per haltering
Gebruiksvergoeding binnen Nederland	Cf. Netverklaring 2017	Cf. Netverklaring 2017	Cf. Netverklaring 2017	Cf. Netverklaring 2017

Tabel 9.4: Gehanteerde kengetallen voor alternatieve exploitatie.

Figuur 5: Gebruikte kengetallen in Goudappel-Coffeng (2018) studie – alternatieve exploitatie

Wat opvalt in *Figuur 5* ten opzichte van *Figuur 4* is de hogere stukprijs van materieel. Deze werden gebaseerd op Nederlandse data, eveneens verwijzend naar de case Groningen-Fryslan. De aanschafprijs is gebaseerd op meer recente data, waardoor de stukprijs voor treinen heel wat hoger ligt dan de NMBS waardes. Volgens de uitvoerders van de studie kan de NMBS als grote groep meer druk zetten op de prijsvorming dan kleinere alternatieve operatoren, waardoor de stukprijs van een alternatieve operator steeds hoger zal uitvallen.

Opvallend is ook dat de onderhoudskosten per treinstelkilometer meer dan de helft lager liggen dan deze gegeven door de NMBS. In totale exploitatiekosten is er echter een relatief beperkt verschil tussen NMBS exploitatie en alternatieve exploitatie, door de lagere stukprijs van materieel. De **hybride** variant werd gebaseerd op de geschatte kostprijs van de Stadler WINK FLIRTINO stellen.

Deze werd ook door Riccardo & Arcadis voor de studie van de Noordelijke lijnen in Groningen en Fryslan gebruikt. Voor de **waterstof** variant werd de Coradia iLint van Alstom als mogelijk alternatief naar voren geschoven. Bij gebrek aan een inschatting van de kostprijs werd de prijs gelijkgezet aan de prijs van een nieuwe dieseltrein.

Variant	Exploitatie onder NMBS-regime		Alternatieve exploitatie			
	Diesel	Elektrisch	Diesel	Elektrisch	Hybride	Waterstof
Variant 1	€ 12,8	€ 12,0	€ 10,8	€ 9,5	€ 9,7	€ 11,5
Variant 2	€ 20,6	€ 19,2	€ 17,6	€ 15,4	€ 15,8	€ 18,4
Variant 3	€ 20,0	€ 18,7	€ 17,0	€ 14,9	€ 15,2	€ 17,7
Variant 4	€ 11,3	€ 10,5	€ 10,4	€ 9,2	€ 9,5	€ 10,8
Variant 5	€ 13,6	€ 12,7	€ 12,6	€ 11,3	€ 11,5	€ 13,1

Figuur 6: Vergelijking totale operatorkosten onder verschillende exploitatie - Goudappel-Coffeng (2018) in miljoen euro voor verschillende varianten

De verschillen in de exploitatiekosten zijn over het algemeen beperkt. De variant met waterstof komt over het algemeen als het duurste alternatief naar voren, maar scoort lager dan de exploitatie door NMBS. De uitvoerders van de studie geven echter zelf toe dat de exploitatiekosten van de alternatieven mogelijk onderschat zijn, vooral deze van de waterstofvariant.

Relevant voor onze studie zijn de kosten van elektrificatie van de spoorlijn. Om de infrastructuurkosten van het tracé te bepalen verwijst deze naar Infrabel. Ze hanteert een prijs van €1.2 miljoen per kilometer voor elektrificatie (dubbelspoor, exclusief tractie-onderstations en sectioneerposten). Voor de onderstations en sectioneerposten wordt €8.6 miljoen gehanteerd per stuk. Bij partiële elektrificatie worden 30% van de kosten verondersteld van volledige elektrificatie.

2.3 Alternatieven voor dieseltreinen in Rheinland-Pfalz Sud

Duitsland heeft de grootste markt voor dieseltreinen in Europa. Met het oog op strengere emissienormen en lange termijn stijgingen van de dieselprijs wordt ernaar gekeken om de dieselvloot echter af te bouwen. Een belangrijke hindernis is dat ongeveer 40% van het Duitse spoorwegennet nog niet is geëlektrificeerd. Kosten om te elektrificeren zijn eveneens aanzienlijk. Daarom is in Duitsland grote interesse voor alternatieve aandrijvingen ontstaan. We verwijzen naar de studie van TU Dresden door Witteman & Meinelt (2019)³. Zij bekeken een aantal mogelijkheden voor alternatieve aandrijvingen in Rheinland-Pfalz Süd.

Concreet bestudeerden zij de volgende mogelijkheden:

- Nieuwe dieseltreinen met lage emissie van NOx en fijnstof
- Batterij-elektrisch hybride met bovenleiding
- Dieselelektrisch hybride (dual mode)
- Dieselelektrisch hybride met batterij
- Waterstoffrein

³ Witteman T., Meinelt F., 2019. Bewertung von konventionellen und alternativen Antrieben für den Rheinland-Pfalz Takt 2030 unter besonderer Betrachtung des Pilotprojekts „Pfalznetz“, TU Dresden

Volledige elektrificatie van het net werd bij voorbaat uitgesloten door de hoge kosten die hiermee verbonden zijn. De studie kijkt voornamelijk naar de totale exploitatiekosten van de lijnen en het totale net. Deselexploitatie blijkt over het algemeen nog steeds de laagste exploitatiekost te hebben, maar het verschil met de alternatieven is relatief beperkt. Diesel heeft nog steeds als voordeel dat het een technologie is die volledig op punt staat en dus aan lagere kost kan aangeschaft worden. Hoewel de aandrijvingskosten en energieverbruik hoger zijn, is er ook haast geen extra infrastructuur nodig (tankstations en infrastructuur zijn grotendeels aanwezig) en is er geen nood aan het vervangen van dure batterijen of brandstofcellen.

Als voordeligste alternatieve technologie komt voornamelijk de batterijtrein naar boven. Hoewel deze een hoge investeringskost kent, is deze ook het voordeligste in gebruik door relatief lage energiekosten. De onderzoekers geven aan dat de kost van bijkomende laadinfrastructuur of gedeeltelijke elektrificatie van het net sterk doorwegen. Indien men bijkomende kosten voor infrastructuur achterwege kan laten of sterk beperken, dan scoort de batterijtrein ook lager in exploitatiekosten dan diesel.

De dieselelektrische varianten (zowel zonder als met batterij) scoren vrij slecht. Dit kan misschien verrassend overkomen, gezien de flexibiliteit van zo'n treintype en de relatieve maturiteit van de technologie. De reden is dat deze treinen heel wat zwaarder zijn dan een gewone dieseltrein, zodat deze in het totale energiegebruik slecht scoren. Daarnaast hebben ze een hogere aanschafwaarde en is er ook meer onderhoud nodig dan voor een normale trein. Dat laatste is zeker zo indien ook voor een bijkomende batterij wordt gekozen.

Het gebruik van de waterstoftrein was bij verre het duurste alternatief. De hoge prijs van waterstof, de nodige investeringen in tankwagens en infrastructuur en de aanschafkost van de trein zelf geven een sterke tegenindicatie voor het gebruik van waterstoftreinen. De prijs die gehanteerd wordt voor waterstof in deze studie is echter niet publiek. Door dit te vergelijken met andere studies vermoeden we dat deze rond 5 euro per kg ligt.

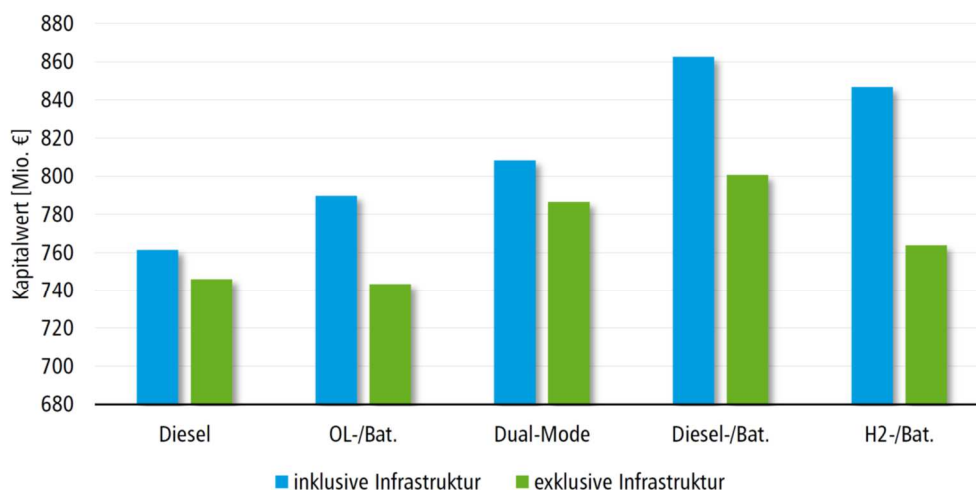


Abb. 3-11 Kapitalwerte im Gesamtnetz (35 Jahre Betrachtungszeit)

Figuur 7: Overzicht van totale kosten in het totale 'Pifaznet' bij verschillende opties (van links naar rechts: Diesel, Batterijtrein, Deselelektrisch, Diesel-batterij, Waterstof). Overzicht bij een horizon van 35 jaar.

2.4 VDE studie

Zoals eerder aangegeven, maken dieseltreinen nog een niet te verwaarlozen deel uit van de Duitse treinen. Met het oog op stijgende diesel prijzen, de nadelige milieu- en klimaateffecten verbonden aan dieseltreinen en het doel om een volledige decarbonisatie van het spoor te bewerkstelligen tegen 2050, wil men evalueren welke technologie een duurzaam en goedkoop alternatief kan zijn voor de verouderde treinstellen. Er wordt aangenomen dat Duitsland na 2025 geen dieseltreinen meer zal aanschaffen.

VDE (2020) bestudeerde drie trajecten rond de stad Düren gelegen in Nordrhein-Westfalen, die worden aangedaan door dieseltreinen, opzoek naar een waardig duurzaam en goedkoper alternatief. De bestudeerde trajecten zijn de RB21 Nord, RB21 Süd en de RB28. Al deze trajecten behelzen een niet-geëlektrificeerd deel van ongeveer 30 km. De frequentie op al deze lijnen zal in 2026 gevoelig opgedreven worden. Het is deels door de verhoging van deze frequentie dat het gebruik van een andere technologie gerechtvaardigd kan zijn. De onderzoekers stellen drie eventuele alternatieven voor en wegen deze af tegen het scenario waarbij er nieuwe dieseltreinen zouden worden in gebruik genomen:

- Elektrificatie (Electric multiple unit = EMU)
- Batterijtrein (Battery EMU = BEMU)
- Waterstoffrein (Hydrogen EMU = HEMU)

Bij de evaluatie per technologische categorie is het van belang dat de specifieke karakteristieken van de lijn in rekening worden gebracht. Een bergachtig landschap zal meer vermogen vragen en zal dus bijvoorbeeld geen ideale situatie zijn voor een batterijtrein. Het zijn deze omstandigheden die een belangrijke invloed kunnen hebben bij het kiezen van de optimale oplossing voor het desbetreffende scenario.

De onderzoekers bepalen het optimale scenario voor de respectievelijke lijn door het uitvoeren van een netto huidige waarde analyse. Hieraan voorafgaand dient de benodigde hoeveelheid kinetische energie bekend te zijn, die de trein nodig heeft om het traject te overbruggen. Wat resulteert in een snelheids- en energieprofiel over het traject. Dit is van belang voor de bepaling van de energiekosten.

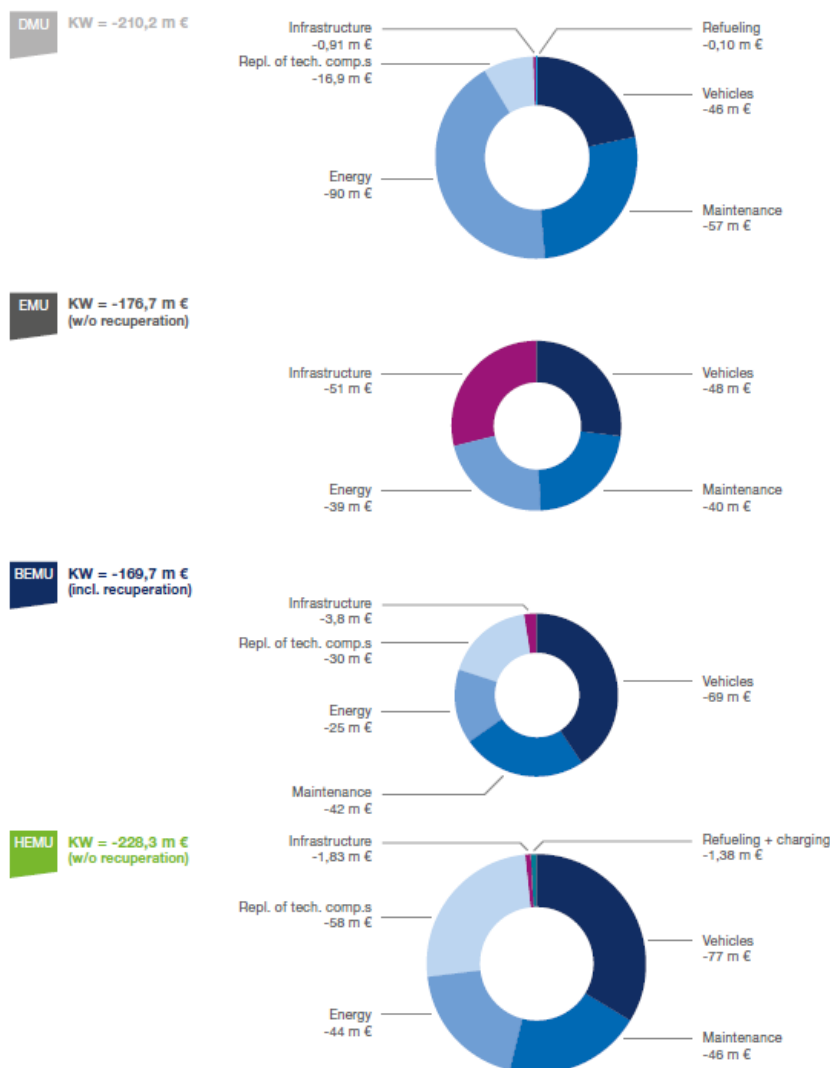
De studie vergelijkt voor het hele gebied rond Düren de kosten verbonden aan de implementatie voor ieder van de vier technologieën. **In een eerste analyse worden kosten verbonden aan het station en het spoor meegenomen, maar aangezien deze voor alle technologieën hetzelfde zijn, zijn ze niet belangrijk voor de bepaling van de goedkoopste technologie.** Uit deze vergelijking bleek, ter volledigheid, dat de kosten van station en spoorinfrastructuur de grootste kosten zijn. De NPV toont aan dat batterijtreinen het voordeligst zijn, gevolgd door de gekende geëlektrificeerde treinen, waterstof en diesel.

De kosten van station en spoorinfrastructuur worden vervolgens, omwille van de eerder beschreven reden, niet meer meegenomen. *Figuur 8* toont de kentallen zoals deze gebruikt werden in de VDE studie. Deze cijfers zijn grotendeels vergelijkbaar met *Figuur 5* met enkele afwijkingen. 1) De aanschafwaarde van dieseltreinen wordt hier significant goedkoper ingeschat. 2) de levensduur van dieseltreinen is lager 3) de onderhoudskosten van dieseltreinen zijn hoger dan deze van waterstoffreinen. De cijfers zijn natuurlijk situatie- en landsafhankelijk. We argumenteren een uiteindelijke keuze voor kentallen in hoofdstuk 5 van deze studie.

Vehicle pool	DMU	EMU	BEMU	HEMU	note
Procurement costs	3,50 m €/veh	4,30 m €/veh	6,20 m €/veh	6,90 m €/veh	3-car
Useful life	25 years	30 years	30 years	30 years	
Maintenance costs	1,20 €/tkm	0,80 €/tkm	0,85 €/tkm	0,95 €/tkm	based on mileage
Inspection cycle	8 years	8 years	8 years	8 years	
Inspection costs	260.000 €/RZ	230.000 €/RZ	230.000 €/RZ	245.000 €/RZ	
Replacement: Component 1	PowerPack	Not applicable	Battery	Battery	
Replacement costs C 1	166.000 €	Not applicable	1.300 €/kWh	1.300 €/kWh	Size – application-specific
Replacement cycle C 1	3 years	Not applicable	8 years	8 years	
Replacement: Component 2	Not applicable	Not applicable	Not applicable	Fuel cell	
Replacement costs C 2				2.000 €/kW	Size – application-specific
Replacement cycle C 2				5 years	
Energy price	1,20 €/l-Diesel 0,50 €/l-AdBlue	12,00 ct/kWh	12,00 ct/kWh	4,50 €/kg-H ₂	from 2026 (assumed)
Infrastructure	for DMU	for EMU	for BEMU	for HEMU	Note
Procurement costs	350 T€/fuel station	1 m €/OL km	5 m €/E-Island	1 m €/fuel st.	
Useful life	30 years	76 years	76 years	30 years	Service life
Operating Costs	20.000 €/year	250.000 €/year	~50.000 €/year	30.000 €/year	
Train path charge (TPS 2020)	4,48 €/km	4,48 €/km	4,48 €/km	4,48 €/km	Non technology-specific
Station fee – stop	3,00 €/stop	3,00 €/stop	3,00 €/stop	3,00 €/stop	Non technology-specific
Station fee – station	5,00 €/stop	5,00 €/stop	5,00 €/stop	5,00 €/stop	Non technology-specific

Figuur 8: Kentallen gebruikt in de VDE studie, DMU = dieseltechnologie, EMU=elektrisch, BEMU=batterij-elektrisch, HEMU=waterstof. Opmerking: tkm staat in deze tabel voor trackkilometer

Figuur 9 toont de netto huidige (totale) waarden van de kosten verbonden aan de verschillende types aandrijvingen. De belangrijkste kosten worden dan: energie – of brandstofkosten, voertuigkosten, onderhoudskosten, infrastructuurkosten en investeringen voor de implementatie van de nieuwe technologie. De rangschikking van de technologie op netto huidige waarde blijft logischerwijs dezelfde. Hierbij wordt het duidelijk dat dieseltreinen het nadeligste alternatief zijn door de hoge energieprijzen, die nog meer onder druk zullen komen te staan in de toekomst, en de onderhoudskosten. Waterstof is voordeliger dan het gebruik van dieseltreinen, maar is een duurder alternatief in vergelijking met de gekende geëlektrificeerde treinen en batterijtreinen, door de hoge kosten verbonden aan de aankoop van nieuwe treinstellen en kosten voor de implementatie van de technologie. Wanneer waterstofftreinen in de nabijheid van een waterstofeconomie gebruikt worden, verkleint deze kost, omdat hij verspreid wordt over verschillende afnemers. Ook de onderhoudskosten zijn relatief hoog. Voor batterijtreinen is vooral de investering in treinen voorzien van een grote batterij van belang. De energie is goedkoop. Andere kosten als onderhoud en technologie zijn relatief gezien lager dan bij waterstof. Bij EMU is het vooral de infrastructuurkost en met name de tractiestations en de bovenleiding die de netto huidige waarde van de technologie negatief beïnvloeden.



Figuur 9: Overzicht van de verschillende netto huidige waarden van de investeringen van de respectievelijke technologieën

In de voorgaande analyse zijn aannames gemaakt voor verscheidene parameters zoals bijvoorbeeld energiekosten, kosten van de bovenleiding, en dergelijke meer. Het is vanzelfsprekend dat deze parameters niet volledig vaststaan en dus kunnen variëren. Om een correcte analyse uit te voeren, bespreekt de studie een gevoeligheidsanalyse en vervolgens ook de effecten ervan op de onderlinge verhouding van de verschillende technologieën. De invloed van de energie – of brandstofkosten, infrastructuurkosten, gewicht en andere parameters worden meegenomen. De gevoeligheidsanalyse maakt duidelijk dat de onderlinge verhouding van de technologieën sterk kan wijzigen bij variërende parameters.

De bespreking van de studie is nuttig omdat het een goede vergelijkingsbasis biedt, om de resultaten van dit rapport tegen af te wegen, aangezien het hier een vrij gelijkaardige case betreft. Het is daarom van belang nogmaals te benadrukken dat de optimale technologie sterk afhankelijk is van de situatie waarin deze wordt gebruikt.

2.5 Franse studie vergroening transport via spoor

We bekijken hier de studie “Le verdissement des matériels roulants du transport ferroviaire en France” Simian B. (2018). Ook in Frankrijk is nog steeds een groot deel van het spoor niet-geëlektrificeerd. De helft van het netwerk is nog niet voorzien van een bovenleiding. Een kwart van de Franse treinen heeft daarom een dieselmotor.

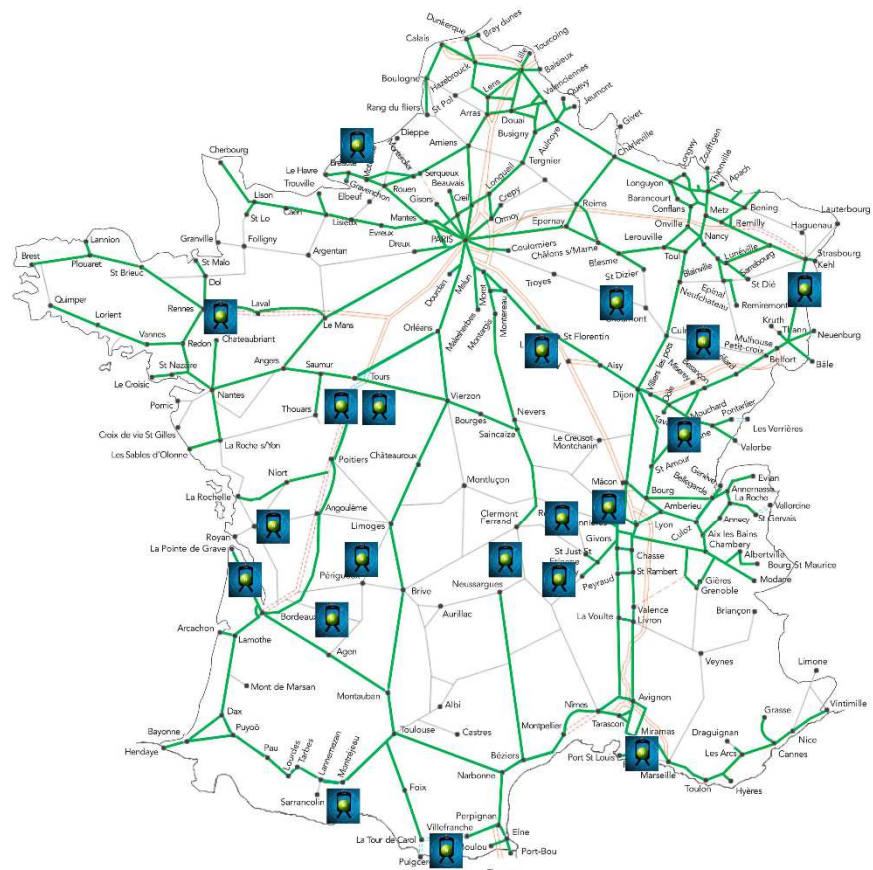
Er zijn verschillende redenen om het aantal dieseltreinen terug te dringen. In de eerste plaats tracht Frankrijk tegen 2050 klimaatneutraal te zijn. Dit wil zeggen dat ook de CO₂ uitstoot in de spoorsector drastisch zal moeten verminderen. Naast polluenten gerelateerd aan klimaat, zijn ook lokale polluenten die het milieu verontreinigen een belangrijke factor om dieseltreinen uit te faseren. Dit type stoot namelijk belangrijke hoeveelheden NO_x en fijn stof (PM) uit. Omdat treinen vaak in stedelijke omgeving rijden is de invloed van deze polluenten zeer schadelijk voor de volksgezondheid. Daarnaast bestaan er bijvoorbeeld in Parijs reeds maatregelen om vervuilende personenwagens en bussen uit de stad te bannen. Het is bijgevolg logisch dat ook andere vervuilende transportmodi geen plaats meer krijgen in de stad. Een laatste reden waarom er nu gekeken wordt naar alternatieven is omdat een deel van de dieseltreinen tussen 2028 en 2030 op het einde van hun levensduur komen. Dit biedt mogelijkheden om een duurzaam alternatief als vervanger klaar te zetten.

Deze studie lijst vier alternatieven op: nieuwe dieseltreinen, treinen op aardgas, batterijtreinen of waterstofftreinen. Het eerste alternatief lijkt niet het beste te zijn. Hoewel een nieuwe generatie dieseltreinen minder schadelijke polluenten zal emitteren, is ze zeker niet klimaatneutraal. Bovendien hebben dieseltreinen een lange levensduur en loopt men het risico na een afzienbare tijd terug verouderde treinstellen te hebben, die op dat moment gedateerd zijn, maar eigenlijk nog een relatief lange levensduur hebben. Treinen op gas zijn op zich een waardig alternatief, aangezien zij tot 95% minder PM, 30% minder NO_x en tot 80% minder CO₂ uitstoten. Toch worden deze treinen slechts weinig bestudeerd, waarschijnlijk omdat ze niet volledig emissievrij zijn. Batterijtreinen kunnen een ander mogelijk alternatief zijn. De aandrijving van de trein brengt geen vervuiling met zich mee. Veel onderzoeken bestudeerden reeds deze optie en een economie rond batterijen, en andere componenten noodzakelijk voor de invoering van dit type treinen, bestaat al. Daarom focust deze studie zich niet op dit alternatief, maar wel op het laatste alternatief, waterstofftreinen, omdat deze wel nog investeringen vereisen om rendabel te zijn.

Het doel van deze studie was dan ook om op te lijsten welke acties noodzakelijk zijn om het gebruik van waterstofftreinen rendabel te maken. Partners uit verschillende sectoren en overheden kwamen

hierbij tot een overzicht waar de ingebruikname van een pilotproject voor waterstoffreinen mogelijk is. Figuur 10 geeft deze locaties weer.

Carte des lignes / zones identifiées par les Régions au terme de la consultation écrite comme susceptible d'accueillir une expérimentation hydrogène



Légende :

- Traction électrique
- Lignes principales non électrifiées
- Autres types de courant en service
- - - Électrification 25000V monophasé en cours
- - - Électrification 1500V en cours
- Lignes à grande vitesse 25000V
- Lignes à grande vitesse 1500V
- - - Électrification LGV 25000V en cours

Lignes ou zones d'expérimentation du train hydrogène identifiées par les Régions

Source : SNCF, Mission sur le verdissement du ferroviaire

Figuur 10: Overzicht van mogelijke locaties voor de ingebruikname van waterstoffreinen

Daarnaast lijst de studie drie belangrijke voorwaarden op, cruciaal om treinstellen op waterstof haalbaar te maken. In de eerste plaats moet de technologie volledig klimaatneutraal zijn. Een tweede voorwaarde beschrijft de noodzaak van een waterstofeconomie. Immers, waterstof dat enkel gebruikt wordt voor spoorvervoer zal te duur zijn, door de te beperkte vraag die ermee samengaat. Daarom is het noodzakelijk dat andere sectoren ook waterstof afnemen, om de vraag te verhogen en de prijs bijgevolg te drukken. Een laatste voorwaarde is dat in de waterstofeconomie die moet worden opgezet, er gebruik gemaakt wordt van groene waterstof. Dit is waterstof die geproduceerd wordt met behulp van hernieuwbare energiebronnen.

3 Treintypes

3.1 Klassieke dieselstellen

De NMBS gebruikt voor de uitbating van de niet-geëlektrificeerde lijnen nog steeds de MW 41 (of AR 41) treinstellen. Deze werden sinds het jaar 2000 in gebruik genomen. Er werden 96 stellen van dit treintype besteld bij Alstom. De MW 41 heeft een diesel-hydraulische aandrijving gegarandeerd door 2 Cummins motoren met een gezamenlijk vermogen van 970 kW. Het is een tweedelig treintype met een maximum reizigerscapaciteit van 150 personen. Het voornaamste nadeel van deze treinen en van dieseltreinen in het algemeen, is de hoge uitstoot van CO₂, stikstofoxide en fijn stof. Daarnaast heeft deze trein een hoge energiekost en is deze onderhoudsgevoelig. Dieseltreinen hebben echter ook voordelen. Zo zijn ze flexibel inzetbaar en hebben ze een autonomie van om en bij 1000 kilometer. Daarnaast is de technologie volledig gekend bij de NMBS en kan al het onderhoud binnenshuis gebeuren. De levensduur van een trein wordt ingeschat op ongeveer 35 jaar. Dit betekent dat deze treinen in principe nog tot 2035 inzetbaar zouden zijn. De Cummins dieselmotoren zijn echter verouderd, waardoor deze in principe niet meer aan de strengere Europese emissiestandaarden beantwoorden. Zo voldoet de Cummins motor nog aan de UIC (I) standaard (deze was geldig tot eind 2002), maar niet langer aan de UIC (II) standaard en de nu geldende UIC(III)/EU Stage IIIa standaard. Daardoor wordt de EU emissiestandaard van deze motoren in principe al sinds 2005 niet meer gehaald. Ze kunnen operationeel blijven, zolang de motoren geen apart onderhoud nodig hebben of opnieuw gecertificeerd moeten worden.

In deze studie bekijken we ook een alternatief dieselveertuig. Het is immers niet uitgesloten dat de exploitatie van de lijn nog met dieselveertuigen kan voortgezet worden met nieuwe dieselveertuigen. Er zijn hiervoor nog een aantal bestaande opties op de markt. Een voorbeeld is de Alstom (Coradia) LINT die qua vormgeving en gebruik vergelijkbaar is met de MW 41. LINT staat hier voor “Leichter Innovatiever Nahverkehrstriebwagen”. Het is op basis van dit treintype dat Alstom ook een door waterstof aangedreven variant heeft ontwikkeld. De bestaande varianten van de Coradia LINT zijn steeds tweeledige treinstellen met tussen 100 en 150 zitplaatsen. Recent (in 2018) werden nog een 52 tal van deze treinen ingezet in Sachsen-Anhalt. Het voornaamste voordeel van een nieuwe dieseltrein is dat in deze motoren ook nieuwe ontwikkelingen worden opgenomen waardoor hun uitstoot in lokale pollutanten behoorlijk lager ligt en wel beantwoordt aan de nu geldende EU regelgeving. Indien we in deze studie refereren naar “nieuwe dieseltreinen” gaan we uit van een type trein dat vergelijkbaar is met de Coradia LINT 41.



Figuur 11: MW 41 dieseltrein (links), Corradia Lint 41/H in uitbating van Veolia (rechts)

3.2 Elektrische treinstellen

De NMBS heeft een grote vloot elektrische treinstellen. Het gaat hier in hoofdzaak om drieledige treinstellen zoals de MR96, MR80 en MR08 (“Desiro”). De Desiro is een van de meest recente uitbreidingen van de NMBS vloot. Een elektrische trein heeft een continue bron van elektrische stroom nodig, aangeleverd door een bovenleiding. Remenergie kan wel gerecupereerd worden in de Desiro-trein. De gegenereerde energie wordt opnieuw naar de bovenleiding gestuurd en bijgevolg dus op het elektriciteitsnet gebracht als aanbod. Deze gerecupereerde energie wordt dus niet in de trein zelf opgeslagen in een batterij.



Figuur 12: MR08 of Desiro in gebruik bij NMBS

De Desiro is niet rechtstreeks vergelijkbaar met de MW41 dieseltreinen, gezien deze zwaarder (146 ton versus 98 ton) is en meer zitplaatsen (280 versus 150 personen). De Desiro heeft dus een grotere reizigerscapaciteit dan doorgaans op de nog resterende lijnen met dieseltractie gebruikt wordt. Om de vergelijkbaarheid met de MW 41 te garanderen zullen we de kosten van de trein herrekenen naar een tweeledig voertuig. We gebruiken hiertoe informatie bekomen via de NMBS (Tabel 2).

Tabel 2: kostenspecificatie van de MR/MS 08/‘Desiro’, herrekening naar een 2-ledig voertuig, bron: NMBS

MR08	Koprijtuig ABx (met tractie)	Koprijtuig ABDx (met tractie)	Middenrijtuig B (zonder tractie)
Zitpl. 1 ^e	16	16	0
Zitpl. 2 ^e	76	50	104
Klapstoel pl.	0	18	0
PMR/fiets pl.	0	2	0
Staanpl. 2/m ²	36	46	40
Staanpl. 5/m ²	92	116	100
Totaal zitpl. 3-ledig	280		
Totaal zitpl. 2-ledig	176		
massa ES leeg [t]	51	51	39
massa ES beladen [t]	60	60	49
Totaal massa ES leeg 3-ledig [t]	141		
Totaal massa ES leeg 2-ledig [t]	102		
Prijs 2008 3-ledig [M€]	5		
Prijs 2008 2-ledig [M€]	3.8 ⁴		

⁴ Geschat op prijs optie 4^{de} voertuig

3.3 Elektrische treinen met pantograaf en batterij

Dit treintype heeft een elektromotor en een reservebatterij van 400 tot 600 kWh met een autonomie van rond 40-80 km afhankelijk van de weersomstandigheden en het terrein. Er worden sinds dit jaar enkele commercieel inzetbare alternatieven aangeboden. De trein rijdt op elektriciteit en laadt geleidelijk op zolang er een bovenleiding aanwezig is. Dit kan ook gedurende wachttijden in stations of op speciale daarvoor voorziene laadpunten. Daarnaast wordt de batterij gebruikt om een deel van de remenergie te recupereren. Als materiaal wordt vaak het LTO of Lithium Titaan Oxide gebruikt. Dit is duurder, maar duurzamer dan het type batterijen dat in auto's wordt ingebouwd. De levensduur van deze batterijen zou tussen 8 en 10 jaar moeten liggen volgens de huidige technische specificaties.

Het opladen van de batterij kent enkele beperkingen. De pantograaf kan slechts een bepaalde laadstroom gebruiken bij stilstand in het station. Dit is 200 A per pantograaf, wat werd vastgesteld om de opwarming van de bovenleiding te beperken. Gegeven een netspanning van 3kV (wat de algemene norm is in België) betekent dit dat de batterij aan maximum 600 kW kan bijladen. In praktijk is dit echter lager, omdat de pantograaf ook andere stroomafnemers moet voeden. In het ergste geval blijft hierdoor maar 100 A over, of een maximum van 300 kW. Dit betekent een stilstand van 30 min tot 1u om 300 kWh bij te laden. Een extra pantograaf of speciale laadinfrastructuur met een vaste leiding kan hier soelaas bieden. Een extra pantograaf laat bijvoorbeeld toe om de laadstroom te verdubbelen (400 A). Laadinfrastructuur heeft een laadvermogen van ongeveer 2000 kW (2 MW).

Bij een hogere netspanning is het in theorie mogelijk om de batterij sneller op te laden, maar laden bij een te hoog voltage kan weer leiden tot schade aan de batterij. In België is 25 kV beschikbaar voor de hoge snelheidstreinen. Recent werden in het zuiden van het land ook enkele lijnen met 25 kV uitgerust (lijn 42 Rivage-Gouvy, lijn 165 in kader Athus Maaslijn) voornamelijk voor internationaal verkeer. Indien in Charleroi gekozen wordt voor (partiële) elektrificatie van de lijn Charloi-Couvin kan in theorie overwogen worden om een hogere netspanning toe te passen. Wij zullen echter in praktijk uitgaan van een universele netspanning van 3 kV in België.

Belangrijk hier is dat eenmaal de trein in beweging is, het mogelijk wordt om tegen een hogere laadstroom te laden. In theorie kan dan bijna het tienvoudige (2000 A) als laadstroom gebruikt worden. Dat betekent dat opladen in beweging efficiënter is. Daardoor kan de trein bijna volledig opladen na enkele minuten onder een bovenleiding te rijden. Maar ook hier verschilt de theorie met de praktijk. De stroomafnemer per motorstel wordt gedimensioneerd om in treinschakeling stabiel stroom te blijven afnemen. Passage op snelheid van meerdere opeenvolgende stroomafnemers creëert golfbewegingen in de bovenleiding die stroomafname bemoeilijken voor de achterste stroomafnemers. Daardoor worden de sleepstukken lichter gemaakt, mede verantwoord door de lagere vermogens van motorstellen t.o.v. locomotieven. Op MR08 is daarom bijvoorbeeld een beperking van 1000A per motorstel.

Daarnaast kunnen bijkomende beperkingen zijn op het laadvermogen, omwille van technische redenen of omwille van coasting⁵, elektrisch remmen en andere. Mogelijk zijn er ook beperkingen op het netwerk, indien bepaalde tractiestations bijvoorbeeld gedurende langere tijd een groot (laad)vermogen dienen te leveren kan een herdimensionering noodzakelijk zijn.

⁵ Rijden zonder tractie te gebruiken, dus enkel op bewegingsinertie.

Tabel 3: Oplaadcapaciteit batterij - theoretisch voorbeeld-eigen uitwerking op basis van Siemens

	Stilstand	Beweging
Theoretisch maximum laadstroom(A)	200	2000
Spanning net (kV)	3	3
Laadvermogen (kW)	600	6000
Bijladen per min (kWh)	10	100
Extra bereik per min	2.1	21.0

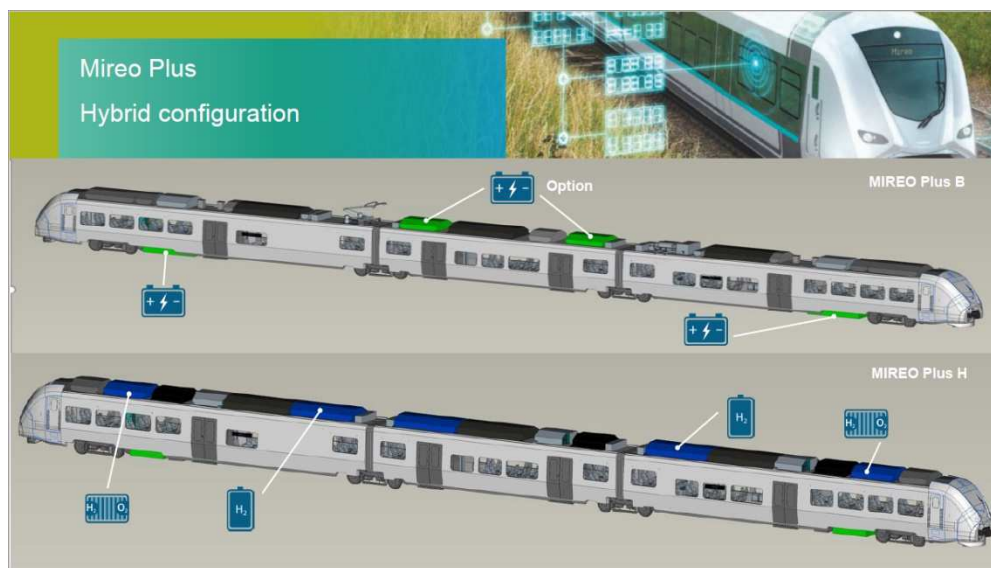
Siemens bouwde in Oostenrijk een aantal gewone Desiro's om naar een batterijvariant: "De Siemens Cityjet Eco".



Technical Data	AC mode	Battery mode
Wheel arrangement	Bo'Bo'+2'2'+Bo'Bo'	
Track gauge	1,435 mm	
Maximum speed	140 km/h	120 km/h
Traction power	up to 2,600 kW	
Installed battery capacity		528 kWh
Starting acceleration	1.0 m/s ²	0.77 m/s ²
Power supply	15 kV AC / 25 kV AC	
Length (over coupling)	75,152 mm	
Floor height	600 mm	
Entrance areas	6 on each urban train	
Capacity	244 seats on urban train	
Maximum axle load	< 17 t including traction battery pack	
Crashworthiness	TSI and EN 15227 conform	
Fire protection	CEN / TS 45545 and DIN 5510 Fire protection level 2	

Figuur 13: Desiro Cityjet Eco - OBB exploitatie met technische details

De prototype Cityjet Eco werd getest in de Alm vallei in Oostenrijk eind 2019 en bleek in staat om voldoende zekerheid te bieden voor operator en passagiers. Net zoals in Duitsland, is in Oostenrijk nog een groot deel van het netwerk (1300 kilometer) afhankelijk van dieseltractie. Deze tests waren dus uiterst relevant. Siemens heeft aangekondigd dat het op basis van ervaringen met deze trein een nieuw treinconcept uitwerkt als de Siemens Mireo Plus B. Deze werd ontwikkeld als een kortere en lichtere variant van de gewone EMU Mireo met het oog op Batterij en Waterstof hybridisatie. De Mireo Plus B is in productie sinds 2018. In Baden-Württemberg zullen 20 tweeledige Mireo Plus B treinen in gebruik worden genomen tussen 2021 en 2023.



Platform	Configuration	Performance	Track class	Max. V	Batt. Capacity						H2 Capacity							
					1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8
Mireo Plus B	2-car 120 Seats	Standard	C (<20 t)	160				80 km										
		Range	C (<20 t)	140				90 km										
		Lightweight	B (<18 t)	140	40 km													
	3 car 165 Seats	Standard	C (<20 t)	160					100 km									
		Range	C (<20 t)	140					120 km									
		Lightweight	B (<18 t)	140				60 km										
Mireo Plus H	2-car 120 Seats	Standard	C (<20 t)	160									600 km					
	3 car 165 Seats	Standard	C (<20 t)	160											1000 km			

Figuur 14: Mireo Plus B en Plus H

Alternatieve opties voor treinen met batterijen zijn de Bombardier Talent 3 (BEMU) en Stadler Flirt Akku. Beide types treinen zijn al commercieel inzetbaar. De Bombardier Talent wordt ingezet in het Saar gebied en Noord-Italië. De Stadler Flirtino Akku wordt ingezet in Schleswig-Holstein ter vervanging van 55 dieseltreinen.



Figuur 15: Bombardier Talent 3 (BEMU) links en Stadler Flirt Akku (rechts)

De Mireo Plus B, Talent 3 en Stadler Flirt treinen hebben vergelijkbare technische specificaties. Deze studie gaat uit van een driestellig BEMU type, gezien deze ongeveer dezelfde aantal zitplaatsen biedt als de MW 41 dieseltreinen die nu ingezet worden door de NMBS.

Tabel 4: Vergelijking technische specificaties treintypes op batterij (BEMU)

	Mireo Plus B (3 stellig)	Bombardier Talent 3	Stadler Flirt Akku
Aantal zitplaatsen	165	155	154
Max. snelheid	140 km/u	140 km/u	160 km/u
Lengte	60 m	56.2 m	58.6 m
Batterijcapaciteit	540 kWh	440 kWh	600 kWh
Geschatte autonomie	100 km	100 km	Tot 150 km

Een ander belangrijk principe bij batterijtreinen is dat deze, om schade aan de batterij te vermijden, binnen een redelijk nauw operationeel regime moeten gebruikt worden. Dit om te vermijden dat de batterij volledig ontladen wordt. Zo werkt de trein optimaal in een bereik van 30-80% van de batterijcapaciteit. Boven de 80% laadt de batterij trager op en is er kans op oververhitting, een lading van 30% wordt gezien als een veiligheidsmarge die toelaat om indien noodzakelijk toch de batterij te gaan gebruiken zonder het risico te lopen op een volledige ontlading. Dit betekent dat omzichtig moet worden omgegaan met geafficheerde autonomie en batterijcapaciteit van treinen. In Tabel 5 geven we een voorbeeld van het effectieve operationele bereik van een trein met een batterij van 540 Kwh)

Tabel 5: Bruikbare capaciteit batterij en effectief operationeel bereik:

Batterijcapaciteit (totaal kWh)	540
Lading op 80% (kWh)	432
Lading op 30% (kWh)	162
Operationele capaciteit (kWh)	270
Geschat effectief operationeel bereik (km)	57

3.4 Waterstofftreinen

3.4.1 Synthese van waterstof

Omdat waterstofftreinen logischerwijze aangedreven worden door waterstof, is een korte uiteenzetting over waterstofsynthese nuttig. We onderscheiden drie verschillende syntheseprocessen naar kleur: grijze, blauwe en groene waterstof. Grijze waterstof wordt geproduceerd uit fossiele brandstoffen via CO₂ intensieve productie processen. Twee technieken zijn momenteel het meest gebruikt. De eerste is 'steam methane reforming' (SMR), de tweede gasificatie van steenkool. Deze technologieën zijn al relatief lang in gebruik en maken gebruik van fossiele brandstoffen, dewelke momenteel nog relatief goedkoop zijn. Ook de grote schaal waarop het productieproces plaats vindt, biedt kostvoordelen. De besproken elementen leiden tot de huidige lage grijze waterstofprijzen die schommelt rond €1.50 per kilogram waterstof. Het nadeel van dit type waterstof is, zoals aangegeven, de uitstoot van CO₂-emissies die vrijkomen tijdens het productieproces, door het gebruik van fossiele brandstoffen. De groep Roland Berger schat in een rapport uit 2017 de uitstoot op 9kg CO₂ per kg H₂. Tegen een achtergrond van verduurzaming is dit een niet-gerechtvaardigde CO₂ uitstoot. Daarom wordt er gekeken naar duurzame alternatieven voor het gebruik van grijze waterstof. Daarnaast zal de kostprijs van grijze waterstof in de toekomst hoogst waarschijnlijk toenemen door een

toenemende gasprijs, alsook door de stijging van de prijs van de CO₂-emissierechten, wat het gebruik van alternatieve types waterstof op een andere wijze verantwoordt.⁶

Een alternatief voor grijze waterstof is blauwe waterstof. Blauwe waterstof verschilt niet van grijze waterstof in het productieproces. De productie van beide gebeurt met behulp van een, op fossiele brandstoffen gebaseerd, productieproces, hetzij via gasificatie van steenkool of via SMR. Het verschil zit in de behandeling van de emissies tijdens het productieproces. Bij blauwe waterstof worden de CO₂-emissies afgevangen via ‘*carbon capture and utilisation*’ (CCU). Dit proces zorgt ervoor dat er geen emissies in de atmosfeer terecht komen, maar dat ze worden afgevangen en de CO₂ eventueel gebruikt wordt in productieprocessen in andere industrieën. De kostprijs van blauwe waterstof hangt dus af van de kostprijs van de fossiele brandstoffen en emissierechten én van de CCU stap. Wanneer blauwe waterstof meer gebruikt wordt, en CCU dus meer op de kaart komt te staan, zal de technologie schaalvoordelen ontwikkelen. Hierdoor zal de extra kost verbonden aan het afvangen van de CO₂ uitstoot in de toekomst eerder beperkt blijven. Bijgevolg zal het verschil in kostprijs tussen blauwe en grijze waterstof zeer gering worden.

Een tweede duurzaam alternatief is groene waterstof. De elektrolyse gebeurt met hernieuwbare energie. Dit brengt de emissies verbonden aan de productie van groene waterstof op 0kg CO₂ per kilogram waterstof. Het nadeel van het gebruik van hernieuwbare energie voor elektrolyse is de hoge kostprijs van waterstof. Deze schommelt rond €3.50 en €5.00 per kilogram waterstof. Om de kostprijs terug te dringen zal vooral moeten worden ingezet op het verlagen van de kost van hernieuwbare energie. Dit kan door de productie ervan te verplaatsen naar landen die hiervoor het meest geschikt zijn. Zonne-energie kan bijvoorbeeld het best worden opgewekt in Noord-Afrika, het Midden-Oosten en Latijns-Amerika. Door schaalvoordelen van het elektrolyseproces anderzijds, zal de kostprijs in de toekomst ook verder dalen. Dit maakt dat waterstoffreinen in de toekomst zowel een duurzaam als gunstig geprijsd alternatief kunnen worden.^{7 8}

3.4.2 Types waterstoffreinen

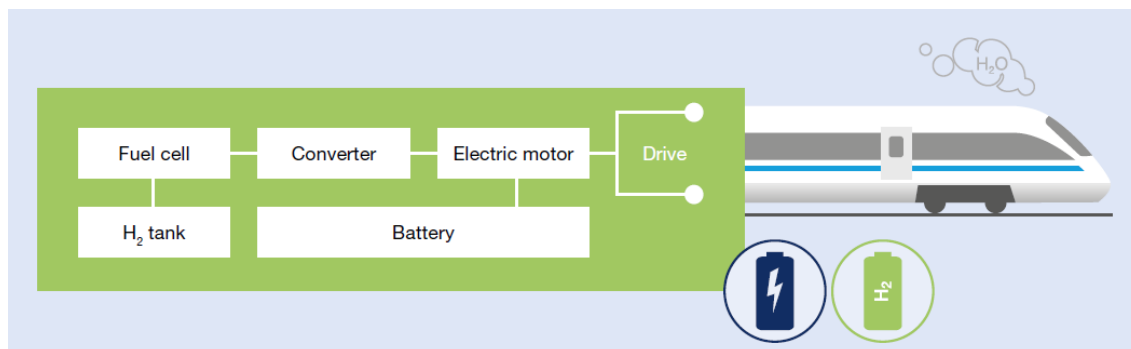
In de categorie waterstoffreinen zelf zijn er twee varianten. Een eerste variant is deze waarbij de waterstof fungeert als brandstof in een verbrandingsmotor. De energie opgeslagen in gecompriemd waterstof, wordt omgezet in thermische energie bij de verbranding van waterstof. De thermische energie gaat via de cilinders over tot kinetische energie die de trein aandrijft. Het verbrandingsproces dat leidt tot de productie van thermische energie, heeft een beperkte efficiëntie. Aangezien het proces gelijkaardig verloopt aan dat bij een dieseltrein, waar diesel fungeert als brandstof in de verbrandingsmotor, zijn beide processen vergelijkbaar qua rendement. Bij een tweede variant waterstoffreinen, wordt de energie die opgeslagen is in de waterstof niet omgezet tot kinetische energie via een verbranding, maar via een brandstofcel. Een brandstofcel is een chemische cel waarbij een anodische en kathodische reactie een potentiaalverschil veroorzaken. Hierdoor ontstaat een stroom die de elektrische motor van de trein aandrijft. De chemische reactie in de brandstofcel verloopt efficiënter dan de verbranding in de verbrandingsmotor, waardoor het rendement van dit type waterstoffrein hoger is. Dit type trein is in principe een waterstof-batterij elektrische trein. De opgewekte stroom in de brandstofcel is echter niet groot genoeg om een voldoende hoge acceleratie

⁶ <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WEInsights-Brief-New-Hydrogen-economy-Hype-or-Hope-ExecSum.pdf>

⁷ Fuel Cells and Hydrogen Applications for Regions and Cities vol 2; Cost analysis and high-level business case; Roland Berger; September 2017

⁸ <https://www.ica.org/commentaries/the-clean-hydrogen-future-has-already-begun>

te bekomen. Een batterij levert extra stroom, zodat de trein sneller optrekt. Een bijkomende nuttigheid is dat de batterij het mogelijk maakt remenergie te recupereren en zo terug gedeeltelijk op te laden. *Figuur 16* illustreert de aandrijflijn. Belangrijk om te vermelden is dat de batterij in deze trein veel kleiner is dan deze in de eerder besproken batterijtrein, wat gewichtsvoordeel oplevert (BEMU).



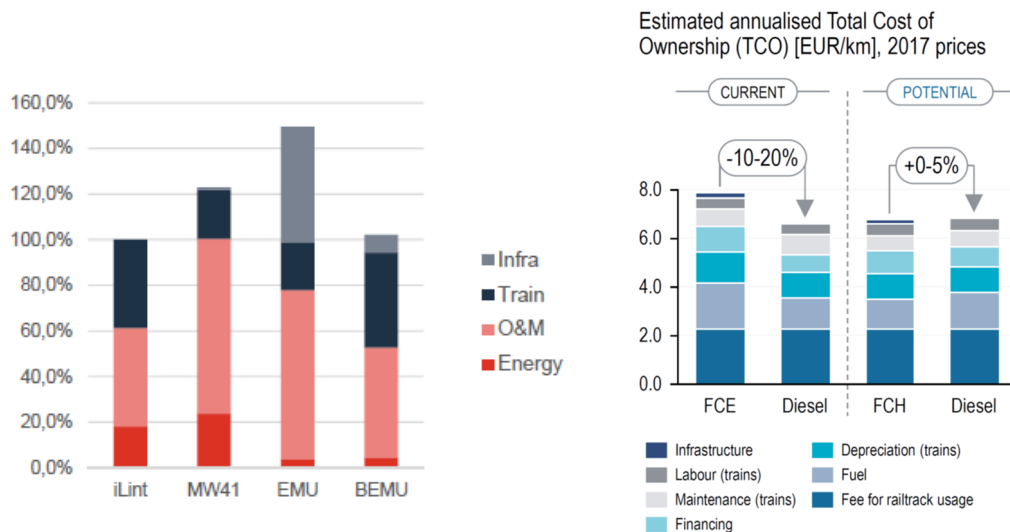
Figuur 16: Schematische voorstelling van de aandrijflijn van een waterstoffrein

Het grote voordeel van een waterstoffrein ten opzichte van een batterijtrein is dat deze een veel grotere autonomie heeft. Daarom zijn waterstoffreinen perfect inzetbaar in gebieden waar er zeer weinig laadmogelijkheden zijn. Een waterstoffrein heeft een geschatte autonomie van 800 tot 1000 kilometer, waardoor deze in gebruik in principe veel flexibeler kan worden ingezet dan batterijtreinen. Het bijtanken verloopt vergelijkbaar met een gewone dieseltrein, hoewel speciale infrastructuur moet voorzien worden. Het voornaamste nadeel van de waterstoffrein is dat deze veel minder energie-efficiënt is en er slechts zeer beperkte tankinfrastructuur voor waterstof beschikbaar is. Daarom opereren waterstoffreinen beter in een zone waar er een actieve industrie met een waterstofcluster is. Een ander nadeel van waterstoffreinen is dat de brandstofcel gevoelig is aan onderhoud. Daardoor moet deze naar schatting om de 2 tot 5 jaar vervangen worden. Dit betekent in praktijk een zevental keer tijdens de levenscyclus van de trein.

De Coradia iLint werd gebaseerd op de LINT dieseltreinen van Alstom. Deze trein kreeg additionele waterstoftanks op het dak gemonteerd en een reservebatterij in de vloer. De trein werd voor het eerst commercieel in gebruik genomen in 2018. In Hessen worden vanaf 2022 een vloot van 27 Coradia's ingezet. De trein is vergelijkbaar qua capaciteit aan de MW 41 met circa 150 zitplaatsen. Een alternatief voor de Coradia iLint is de hierboven besproken Mireo Plus H van Siemens. De Plus H wordt echter pas vanaf 2021 aangeboden. Qua karakteristieken zijn beide treinen vergelijkbaar.



Figuur 17: Coradia iLint




a) *Vergelijking kosten iLint met MW41 en elektrisch (EMU) en batterij-elektrisch alternatief (BEMU). Bron: Alstom (links)* b) *Total Cost of Ownership (totale gebruikskosten) vergelijking van waterstoffrein (FCE/FCH) met dieseltrein in huidige en toekomstige omstandigheden - Bron: Roland Berger, 2017 (rechts)*

Een vergelijking van de kosten van de iLint met de MW 41 en een elektrische en batterij-elektrische variant werd ons in de loop van de studie door Alstom aangeboden (Figuur 18a). Hier ontbraken echter gedetailleerde cijfergegevens bij en daarom moet dit kritisch bekeken worden. In het rapport Roland Berger (2017)⁹ over de applicatie van waterstof in verschillende transportmodi vinden we eveneens een vergelijking terug van waterstofftechnologie (Hydrail) met de huidige dieseltechnologie (Figuur 18b), waarbij de kosten eerder verwacht worden om pariteit te bereiken met dieseltreinen tegen 2022.

Een meer gedetailleerde business case wordt aangeboden in Roland Berger (2019) in Figuur 19. Deze maakt een vergelijking tussen verschillende technologieën (elektrisch, diesel en waterstof) naar totale kosten. Hierbij is ook een opsplitsing gemaakt tussen de verschillende componenten van de kost (onderhoud, brandstof, infrastructuur, depreciatie,...).

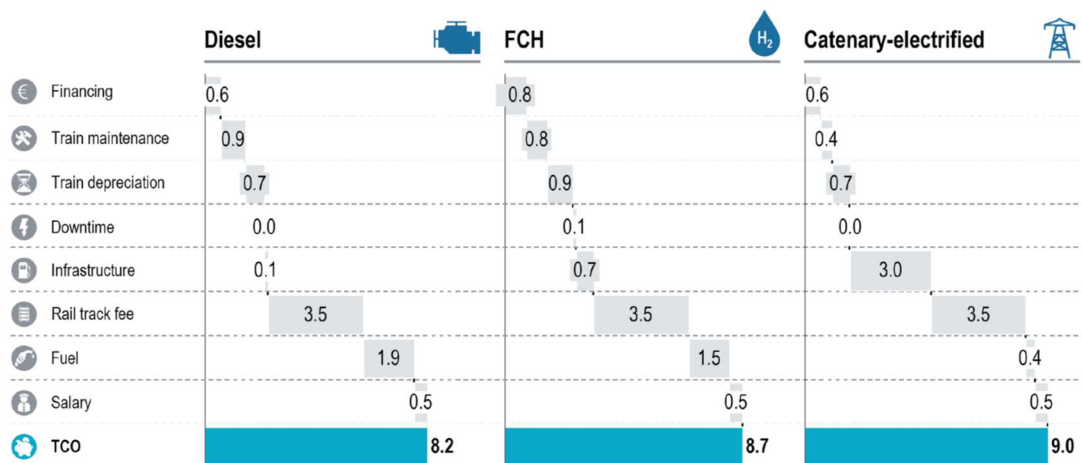
Usage profile¹⁾ for TCO model

- > Passenger operation in regional transport – Medium-sized operator assumed purchasing and operating a batch of 15 FCH trains
- > Typical daily mileage of 800 km per train and 8 h to 10 h in operation – Refuelling overnight at central depot
- > Flat topography with about 8 stops per hour and 10 stops per 100 km
- > Average seat load factor of 50%, availability of 97% (incl. planned maint.)



<p>Power rating 800-1,000 kW</p> <p>> Typical power rating²⁾ ranges from 800 to 1,600 kW</p>	<p>Tractive effort 90 kN</p>	<p>Max. speed 140 km/hour</p> <p>> Typical maximum speed²⁾ ranges from 100 to 160 km/hour</p> <p>> Over longer distances usually higher speed</p>	<p>Hydrogen tank ~250 kg</p> <p>> Typical tank volume²⁾ for a 2-car MU approx. 1,600 l of diesel</p>	<p>Max. range 1,000 km</p> <p>> Typical range^{2),3)} of approximately 1,000 km</p> <p>> Depends e.g. on passengers on board, stops and topography</p>	<p>Price EUR 4.0-5.5 m</p> <p>> Typical price²⁾ ranges from EUR 2.0 to 9.6 m</p>
<p>Acceleration 0.8-1.0 m/s²</p>	<p>Pass. capacity 120 seats (2 units)</p> <p>> Typical seating capacity²⁾ ranges from 100 to 270</p>	<p>Consumption 0.25-0.3 kg/km</p>	<p>Lifetime 30 years⁴⁾</p>		

⁹ Roland Berger, 2017. Fuel Cell and Hydrogen applications for Regions and Cities Vol. 2



Figuur 19: TCO (Total Cost of Ownership) berekeningen uit Roland Berger (2019) - applicatie op passagierstreinen

De vergelijking hierboven geeft hogere kosten aan voor de standaard elektrische trein (€9/km) dan deze van diesel (€8.2/km) en waterstof (€8.7/km). Het voornaamste verschil zit hier in de kost van infrastructuur, die op €3/km wordt geschat voor de elektrische trein. Een lagere totaalkost voor dieseltreinen is geen algemeen resultaat dat men terugvindt in de literatuur. Over het algemeen wordt juist het omgekeerde gevonden (Gattuso & Restuccia, 2014). De onderhoudskosten voor waterstofftreinen worden ongeveer gelijk gesteld als deze van dieseltreinen. Infrastructuurkosten voor waterstofftreinen bedragen ongeveer 25% van deze volledige elektrificatie. Het bovenstaand resultaat mag in geen geval gegeneraliseerd worden naar het volledig spoornet, gezien de kosten voor elektrificatie sterk kunnen verschillen.

4 Methodologie

TML ontwikkelde in opdracht van Infrabel in 2011 een uitgebreide tool om de maatschappelijke waarde van laagbenutte spoorlijnen te evalueren, met het oog op het (her)openen van sommige lijnen. Deze tool werd in 2015 verder ontwikkeld als een meer uitgebreide quickscan tool, die gebruikt kan worden om ondergebruikte lijnen te identificeren met het oog op een mogelijke sluiting van de lijn. Een aantal elementen van deze tool werden opnieuw gebruikt met het oog op de evaluatie van de elektrificatie of alternatieven van niet-geëlektrificeerde lijnen. Deze zijn relatief kort samengevat in Tabel 6.

Tabel 6: Te onderzoeken elementen / mogelijke impacts van de verschillende opties

	Elektrificatie	Batterijtrein	Waterstoffrein
Netbeheerder	Grootste extra kost investering	Enkel kost bij partiële elektrificatie net Mogelijk meer piekafname op bepaalde geëlektrificeerde lijngedeelten.	Kost tank/laad infrastructuur
Operator	Stijging van vergoeding aan netbeheerder Indien generiek materieel -> baat Bij aankoop nieuwe treinen -> kosten Lagere aankoopkosten en geen nood aan reservevloot.	Mireo Plus B (Siemens), Talent 3 (Bombardier) Batterijpak moet elke 7-10 jaar vervangen worden. Dit betekent 2-4x in levensduur Elektrisch meerverbruik, (mogelijk tot 21% en meer) door extra gewicht batterijen en omvorming van elektriciteit Aankoop van nieuwe treinen + nood om reservevloot te hanteren	Commercieel beschikbare alternatieven: Coradia iLint (Alstom), Mireo Plus H (Siemens) Onderhoudsintensief door vervangen brandstofcellen elke 2-3 jaar dus tot 7x in levensduur + accu die mogelijk tot 2x moet worden vervangen Aankoop van nieuwe treinen + nood om reservevloot te hanteren.
Maatschappij	Daling CO2/NOx en andere uitstoot -> emissievaluatie is ingebouwd in tool	Lagere energie efficiëntie door omzetting, waardoor ook meer indirecte CO2 emissies. Impact op milieu door batterijproductie en afbraak	Lagere effectieve daling in uitstoot van CO2, gelijkaardige impact op uitstoot lokale pollutanten.
Reizigers	Beperkte impact, mogelijke voordelen in comfort	Mogelijke restricties door laadtijden worden zoveel mogelijk vermeden Mogelijk minder flexibiliteit in het aanbieden van andere verbindingen.	Nauwelijks een impact, mogelijk comfortvoordelen. Mogelijk minder flexibiliteit in het aanbieden van andere verbindingen
Indirecte baat	/	/	Wisselwerking met ontwikkeling waterstofeconomie

De tool werd ontwikkeld in Excel en bestaat uit een set gelinkte rekenbladen, deze kunnen specifieke lijnen waarden naar 1) bereikbaarheid, 2) energiekosten, 3) investering en onderhoudskosten, 4) emissies en leefmilieu impact. Zowel goederen als personenlijnen (en een mix van beide) kunnen onderzocht worden. Een analyse is mogelijk voor 1 representatief jaar of in een 100 jaar tijdspanne. Standaard gebruiken we een 100-jarige tijdshorizon met een discontovoet van 4%. De 100 jaar tijdspanne is in principe erg lang, maar is wel valabel voor spoorinfrastructuur, die over het algemeen een lange levenscyclus heeft. Door de lange tijdspanne is het daarom niet nodig om met restwaardes te werken. Verschillende waarderingen van emissies kunnen snel met elkaar vergeleken worden via opties in de sheet.

Elke evaluatie met de tool start met een grote set informatie over de lijn

- De lengte van de lijn
- Het aantal kilometer enkel-/dubbelspoor
- De lengte met/zonder bovenleiding
- Aanwezigheid van tractiestations
- Het aantal passagiers
- De amplitude en frequentie van de lijn in piek/dal uren
- De mix tussen personen/goederenverkeer
- Aanwezigheid van geluiddempende infrastructuur
- Verdeling diesel/elektrische treinen

Naast deze elementen houdt de tool ook rekening met mogelijke veranderingen in technologie, waardoor er een autogene evolutie is in de uitstoot van treinen, bussen en auto's. Deze dalen dus op termijn, waardoor sommige investeringen in nieuwe technologie anders kunnen gewaardeerd worden op korte termijn dan op lange termijn. Specifiek voor deze case werden extra elementen toegevoegd. Zo kunnen investeringskosten in rijtuigen, bovenleiding en tractiestations automatisch berekend worden, in de lijn van kentallen van Infrabel. Daarnaast werd systemische sensitiviteitsanalyse bijgevoegd, die het gemakkelijk maakt om snel tussen bepaalde assumpties te switchen.

Bijvoorbeeld

- Inzetten van nieuwe rijtuigen of generisch materieel (standaard gaan we wel uit van nieuwe rijtuigen, gezien de langere tijdshorizon die we in de studie gebruiken)
- Prijs van energiedragers
- Investeringskosten
- Materiaalkosten van diesel, elektrische en de nieuwe varianten batterij/waterstof. Met het oog om ombouw van stellen te kunnen analyseren
- Onderhoudskosten
- Levensduur treinen (30-50 jaar)

De resultaten hieronder zullen we vaak in Net Present Value (NPV) rapporteren. Dit is gebaseerd op een 100-jarige analyse met 4% discontovoet. De prijzen worden berekend in €2020. Het startjaar van de simulatie is steeds 2025. De NPV wordt berekend als

$$NPV = I_{t_0} + \frac{x_{t1}}{1+d} + \frac{x_{t2}}{(1+d)^2} + \dots + \frac{x_{tn}}{(1+d)^n}$$

Met t_0 gelijk aan 2025 en alle opvolgende jaren met een opvolgende index, d gelijk aan de discontovoet en x gelijk aan de totale netto impact van de investering.

5 Keuze kentallen voor studie

5.1 Materieelkosten

De aanschafwaarde en materieelkosten werden ons gemeld door de NMBS. We onderscheiden nieuwe treinen versus de gegevens die we kregen over de MW 41 en de Desiro treinen. De MW41 werd in het jaar 2000 in dienst genomen met een referentieprij van €3.5 miljoen. Gerekend met een gemiddelde inflatie van 2% over de periode 2000 – 2020 (NBB, 2020) geeft dit een referentieprij van €5.2 miljoen. De prijs van een 2-stellige variant van de Desiro met 176 zitplaatsen werd ingeschat op €3.8 miljoen door de NMBS. De Desiro treinen kwamen in dienst vanaf 2011. Gebruiken we een gemiddelde inflatie van ongeveer 1.7% jaarlijks tussen 2011-2020 (NBB, 2020) dan is de referentieprij in 2020 gelijk aan €4.42 miljoen.

Vergelijkbaar onderzoek in verband met passagierstreinen in Gent (Goudappel Coffeng, 2018 – zie ook 2.2) gebruikt de prijs van de Desiro/MR08 (€4.6 miljoen) in NMBS exploitatie, ten opzichte van een prijs van €6.1 miljoen voor een nieuwe elektrische trein in alternatieve exploitatie. De prijs voor deze trein werd gebaseerd op de FLIRT III van Stadler. Voor een nieuwe dieseltrein wordt in dezelfde studie een prijs van €7.2 miljoen gerekend. Dieseltreinen in de huidige omstandigheden zijn 15-20% duurder dan elektrische varianten. Hierbij verwachten we dat de batterij hybride trein ongeveer 10% duurder is dan de gebruikelijke elektrische trein. De waterstofrein schatten we 20% duurder dan de elektrische variant. De prijs van nieuwe treinen is een belangrijke component in de analyse die we later in een sensitiviteitsanalyse opnemen.

We gebruiken in deze studie een nieuwprijs van €5.5 miljoen als nieuwprijs voor een elektrische trein met om en bij 176 zitplaatsen. Dit houdt het midden tussen de schattingen voor Gent-Terneuzen en de geschatte kostprijs voor een 2-stellige variant van de Desiro (zie ook 3.2). De prijs van de batterijrein schatten we 10% hoger in op €6 miljoen. De dieselvariant is 15% duurder dan de elektrische trein en is daarmee €6.325 miljoen. Voor de waterstofrein zijn officiële schattingen niet beschikbaar, maar we gebruiken een 20% bijtelling op de elektrische trein. Daarmee schatten we de kost voor een waterstofrein op €6.6 miljoen.

5.2 Infrastructuurkost

De infrastructuurkosten voor elektrificatie werden ons door Infrabel meegedeeld. Deze zijn naar schatting €0.4 miljoen per kilometer spoor, zodat deze €0.8 miljoen zijn voor dubbelspoor. Voor tractiestations dient een prijs van €5 miljoen per stuk te worden gehanteerd.

In de studie van Arcadis-Riccardo Rail (2018) vinden we cijfers over de infrastructuurkosten. De kosten van een tankstation worden ingeschat op €10 miljoen per stuk. Onderhoud van een tankstation wordt ingeschat op €25.000/jaar. In dezelfde studie vinden we ook een inschatting van de kosten van een windmolen¹⁰ en elektrolyser. De kosten van een 6MW windmolen wordt geschat op 5.5 miljoen euro. De kostprijzen van elektrolyzers zijn in constante evolutie en dalen nog elk jaar, op basis van het rapport komen we op €2.5 miljoen euro voor een elektrolyser met een capaciteit van 1000 kg/dag.

¹⁰ We gaan hier uit van een voorbeeld met windmolen, gezien we uitgaan van ‘groene’ waterstof die uit hernieuwbare energie kan worden geproduceerd. Windenergie is bij verre de meest mature en goedkoopste vorm van hernieuwbare energie die momenteel beschikbaar is.

5.3 Energiekosten

Bij energiekosten gaan we uit van de huidige prijzen, voor waterstof is dat een inschatting. De energieprijs van waterstof is in constante evolutie. De verwachting is dat deze rond 2025 tussen €2/kg en €5/kg zal liggen. In de sensitiviteitsanalyse (Hoofdstuk 12) variëren we deze in een domein van €2/kg tot €10/kg).

De MW 41 heeft een dieselgebruik tussen 1.52 en 1.62 l/km. Als dieselprijs gebruiken we €0.5/l. Een nieuwe dieseltrein zal waarschijnlijk minder verbruiken dan de (ondertussen) verouderde Cummins motoren in de MW41. Het verbruik van een nieuwe Flirt III dieseltrein is volgens Goudappel-Coffeng (2018) ongeveer 1.16 l/km. We ronden naar boven af en gebruiken 1.2 l/km als referentie dieselverbruik voor een nieuwe dieseltrein.

De elektrische trein gebruikt 40 Wh/tkm. Dit geeft een energieverbruik van 4.08 kWh /km voor een elektrische trein van 102 ton. We gaan ervan uit dat de batterijtrein minder efficiënt is door het grotere gewicht dat deze meeneemt. We schatten dat de batterij tot een extra 6% gewicht leidt. Daarnaast is het gebruik van energie uit een batterij nog eens 10% minder efficiënt dan rechtstreeks elektriciteitsgebruik. Daardoor schatten we het energieverbruik van de batterijtrein in op 4.76 kWh/km. Het energieverbruik van een waterstoffrein is volgens Alstom 0.25 kg/km.

De prijs per kWh elektriciteit bedraagt €0.089 /kWh. Deze energieprijs bevat een bijdrage door de NMBS aan de onderhoudskosten van de bovenleiding. Daardoor moet de onderhoudskost van de bovenleiding niet apart meegerekend worden in de MKBA.

5.4 Onderhoudskosten materieel

We gebruiken hiervoor cijfers van de NMBS. Deze zijn €3.6/km voor de MW 41 en €0.97/km voor een elektrische trein. In de studie van Goudappel-Coffeng (2018) worden volgende cijfers gebruikt: €0.91 /km voor een diesel (DMU) en waterstoffrein, €0.69 /km voor een elektrisch voertuig en €0.85/km voor een batterijtrein. Dit lijkt mogelijk een onderschatting, als we dit vergelijken met de cijfers die we van de NMBS bekomen.

Voor een nieuwe dieseltrein is het moeilijk om een degelijke schatting te maken. We blijven dicht bij de cijfers die we van de NMBS gekregen. Voor een waterstoffrein en (nieuwe) dieseltrein gebruiken we €2.4 /km. Op basis van de Roland Berger (2017) studie vinden we immers dat de onderhoudskosten van waterstoffreinen waarschijnlijk vergelijkbaar zijn met deze van dieseltreinen. Voor de batterijtrein hanteren we €1.8/km, dit is hoger dan het onderhoud van een 'gewone' elektrische trein, we nemen hierbij een marge voor de vervanging van de batterij. We nemen hierbij aan dat de extra onderhoudskost wordt verhaald op een langere periode.

5.5 Overzicht

Tabel 7: Overzicht kentallen materieel en infrastructuur

Materiaalkosten	Diesel (l)	Elektrisch (kWh)	Batterij (kWh)	Waterstof (kg)
Gewicht	98 ton (MW 41)	102 ton (2-ledige Desiro)	108.12	107.1 ton
Passagiers (zitplaatsen)	150 ¹¹ (MW 41) 176 (Nieuw)	176 ¹²	176	176
Prijs energiebronnen	€0.5	€0.089	€0.089	€2-€5
Verbruik per km	1.62 l (MW 41) 1.2 l (Nieuw)	4.08 kWh	4.76 kWh ¹³	0.25 ¹⁴ kg
Energiekost (per km)	€ 0.81 (MW 41) € 0.60 (Nieuw)	€ 0.36	€ 0.42	€0.5-€ 1.25
Stukprijs materieel	€3.5 mln (MW 41) €6.325 mln (nieuw) ¹⁵	€4.6 mln. (Desiro) € 5.5 mln (nieuw) ¹⁶	€6 mln	€6.6 mln
Onderhoudskosten (per km)	€ 3.60 (MW 41) €2.4 (Nieuw)	€ 0.97	€ 1.8	€ 2.40

Tabel 8: Overzichtstabel infrastructuurkosten

Infrastructuurkost	Waarde	Bron
Elektrificatie	€0.4 mln/km (enkel spoor)	Infrabel
Tractiestation	€5 mln/stuk	Infrabel
Tankstation waterstof	€10 mln/stuk	Arcadis-Riccardo (2018) / Alstom
Electrolyzer	€2.5 mln/1000 kg synthese per dag +onderhoud €75 k/jaar	Arcadis-Riccardo (2018) / Alstom
Windmolen (3 MW)	€5.5 mln/stuk + onderhoud €150 k/jaar	Arcadis-Riccardo (2018) / Alstom

5.6 Emissies

In Figuur 20 plaatsen we de theoretische efficiëntie van verschillende aandrijfopties naast elkaar. We baseren deze cijfers op Cebon D. (2020) en Hofrichter A. et al (2012). De gehele efficiëntie van een waterstoffrein is iets meer dan 3 maal lager dan deze van een elektrische trein of een batterij-elektrisch hybride.

¹¹ Het gegeven cijfer voor het aantal zitplaatsen voor de MW 41 (150) was een bewuste keuze om het comfort van de reizigers te verbeteren.

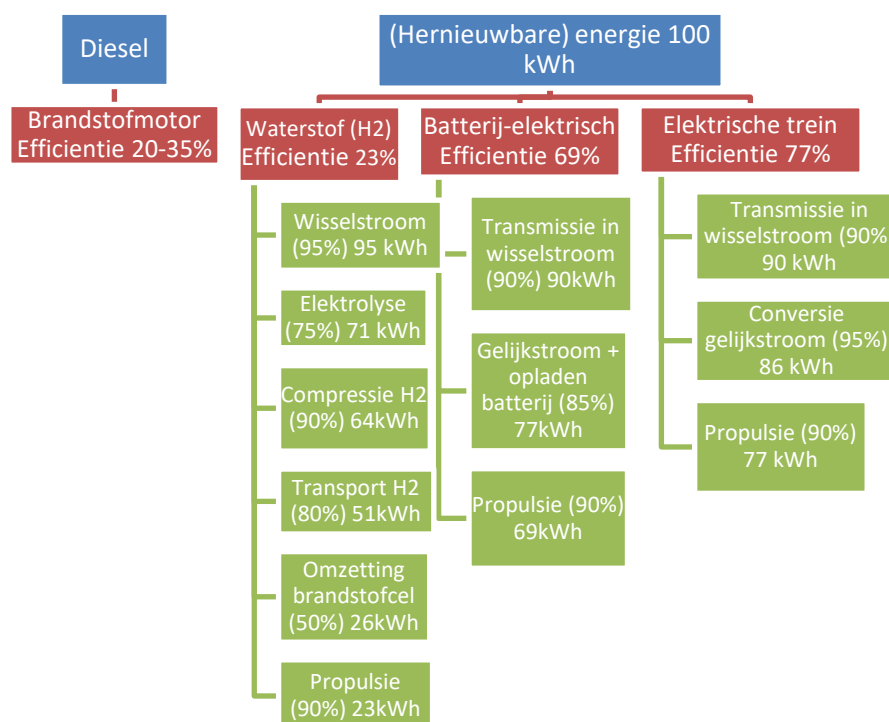
¹² We zetten het aantal passagiers voor de verschillende alternatieven voor de MW41 gelijk op 176. Dit is een schatting. Als er al een mogelijk voordeel is qua zitplaatsen is dit waarschijnlijk in het voordeel van de elektrische trein.

¹³ De cijfers voor het meerverbruik in energie zijn mogelijk een onderschatting. Uit technische commentaar van de NMBS bij afronding van het rapport werd duidelijk dat een meerverbruik van 21% of meer realistischer is bij de batterijtrein. Het gaat hier voornamelijk over verliezen door omvorming en opladen/ontlading van de batterij.

¹⁴ De waterstoffrein heeft een indicatief verbruik van 0.25 kg waterstof / km. Een kg waterstof heeft een energie inhoud van 120MJ of 33.3 kWh. Dit is dus 8.325 kWh. Dit cijfer is het verbruik voordat er omzetting gebeurt in de brandstofcel en de energie wordt omgezet in beweging. Gegeven een efficiëntieverlies van ongeveer 50% bij omzetting van waterstof naar elektriciteit is dit vergelijkbaar met een elektrische trein.

¹⁵ Dit cijfer werd gebaseerd op de Goudappel-Coffeng studie en hanteert de (in deze studie) percentuele meerkost van de dieselvariant tov de elektrische variant. Hierbij wordt rekening gehouden met de kosten per reizigerscapaciteit.

¹⁶ Officiële cijfers van de NMBS schatten de (theoretische) kost van een 2-stellige Desiro/MR08 in op €3.8 miljoen in 2011.



Figuur 20: Alternatieve opties vergeleken met directe elektrische trein: eigen bewerking van Cebon D. (2020) en Hofrichter A. et al (2012)

Elektrische en waterstof aandrijvingen kennen enkel indirecte uitstoot via het elektriciteitsnet. De uitstoot van het normale elektrische net in België is 163 g / kWh CO₂¹⁷ (CREG, 2019). Hiervan is voor de NMBS 1.7% windenergie (zero-emissie). We zullen daarom 160 g/kWh als uitstoot van de energieproductie gebruiken¹⁸. Een nieuwe dieseltrein zal nagenoeg zeker zuiniger zijn dan de bestaande MW41. We zetten daarom de emissies van de bestaande dieseltractie (MW41) naast een vernieuwde dieseltrein. We houden rekening met de indirecte (Well-to-Tank) emissies van diesel die we op 0.617 kg/l schatten (UK, 2019).

Op basis van Tabel 9 maken we de volgende conclusies. Een waterstoffrein gebruikmakend van waterstof uit elektrolyse geeft slechts een beperkte daling in CO₂ uitstoot ten opzichte van (nieuwe) dieseltechnologie. Dit komt door de lage energetische efficiëntie van de waterstofcyclus. Men moet nagenoeg 3 keer meer energie gebruiken voor waterstofproductie dan directe elektrische tractie. Gebruikt men ‘groene’ waterstof dan is de emissie theoretisch gezien nul, maar de omzetting naar waterstof leidt in dat geval wel tot een verlies in elektriciteitsproductie die niet voor andere doeleinden kan ingezet worden. Daardoor is de ‘indirecte’ emissie van waterstof hoger dan het rechtstreeks gebruik van elektriciteit. Gezien nog maar 1.7% van de elektrische treinen hernieuwbare energie gebruikt (zie hierboven) lijkt ons dit dus een acceptabele aanname.

¹⁷ We willen hier opmerken dat de laatste cijfers uit MIRA (2018) voor de emissie / kWh in Vlaanderen 257 g CO₂-equivalent / kWh geven, wat aanzienlijk hoger is. Gezien het Belgisch karakter van de NMBS hanteren we toch 163 g CO₂ / kWh wat het officiële CREG cijfer is. Verschillen in Vlaanderen versus België komen voort uit de elektriciteitsmix.

¹⁸ De indirecte uitstoot van de Belgische energiesector zal mogelijk stijgen in de toekomst door de kernuitstap in 2025. Er bestaat hier echter zeer veel onzekerheid over, zowel over het uitfasen van kernenergie als de groei van hernieuwbare energie om dit op te vangen. We hebben ervoor gekozen om de huidige referentiewaardes te blijven hanteren voor de toekomst.

Tabel 9: Indirecte emissie in equivalent CO2 van diesel, elektrische trein en alternatieven

	Diesel (MW 41)	Diesel (Nieuw)	Waterstof	Batterij-elektrisch	Elektrische trein
Direct energiegebruik/km	1.62l 16.2kWh	1.2 l 12 kWh	0.25 kg 8.325 kWh	4.76 kWh	4.08 kWh
Totaal energieverbruik /km	/	/	17.39 kWh	6.26 kWh ¹⁹	5.3 kWh
Emissies uit verbranding	2.64 (kg/l)		/		
Indirecte emissies	0.617 (kg/l)		0.160 (kg/kWh)		
Directe Emissies (kg/km)	4.28	3.17	/		
Indirecte Emissies (kg/km)	1.0	0.74	2.78	1.00	0.85
Totale emissies (kg/km)	5.28	3.91	2.78	1.00	0.85
Vergelijking tov MW 41	100%	74%	53%	19%	16%

Uit Tabel 9 maken we op dat waterstoffreinen een veel kleinere impact hebben op CO2 uitstoot dan elektrisch aangedreven treinen. Desalniettemin heeft waterstof wel dezelfde voordelen op lokale emissies als de elektrisch aangedreven varianten. We tonen dit aan in onderstaande tabel. We berekenen de emissies van NOx, SO2 en PM voor batterijtreinen uit de indirecte emissies van energieproductie. Op basis van de elektriciteitsmix uit CREG (2019) studie maakten we een eigen berekening van de indirecte emissies van elektriciteit in België. Deze toepassen op het geschatte elektriciteitsverbruik geeft:

Tabel 10: Lokale emissies - SOx, NOx en PM – eigen berekening

Emissies (g/vkm)	Diesel (MW41)	Diesel(nieuw)	Waterstof	Batterij	Elektrisch
SO2	21.2	0	0.00075	0.00025	0.00023
NOX	51.9	10.4	0.00031	0.00010	0.00009
PM	0.7	0.1	0.00074	0.00025	0.00022
NM VOC	0.00309	0	0	0	0

We zien dat deze emissies eigenlijk verwaarloosbaar zijn tov diesel, we veronderstellen deze dan ook gelijk aan 0. Voor de waardering van de emissies verwijzen we naar de waarden uit FPB (2012) “De milieu-impact van de evolutie van de transportvraag tegen 2030” en DG MOVE cijfers uit CE Delft (2019) “Handbook of external cost in transport”.

Tabel 11: Waarderingen emissies, Bron Planbureau (2012) en CE Delft (2019)

Emissie	Waardering in €/ton	
	Lage waardering (FPB, 2012)	Hoge waardering (CE Delft, 2019)
CO2 eq	2020: tussen 18 en 72 2030: tussen 23 en 104 Centrale waarde: 42	voor 2030: tussen 60 en 189 na 2030: tussen 156 en 498 Centrale waarde: 100
SO2	7990	17100
Nox	3999	20600
PM	PM _{2.5} : 140723	47000
NM VOC	1629	3600

¹⁹ Berekend als 4.08 kWh/km (energieverbruik elektrische trein) * 1.06 (impact extra gewicht batterij) / 0.69 (efficiëntie batterijtrein)

Hieronder berekenen we nogmaals op basis van de gegevens in bovenstaande tabellen de totale emissiekost van de MW41 (Tabel 12) en een theoretische nieuwe dieseltrein, die beantwoordt aan de huidige EU normen (

Tabel 13). Gezien zowel de elektrische trein, batterij en waterstof geen lokale noch directe emissies veroorzaken houden we enkel rekening met indirecte emissies (

Tabel 14)

Tabel 12: Totale emissiekost MW41 in €/l en €/vkm

Polluent	Emissies MW41	Lage waardering (FPB, 2012)			Hoge waardering (CE Delft, 2019)		
		€/g	€/vkm	€/l	€/g	€/vkm	€/l
SO2	21.2	0.008	0.17	0.10	0.017	0.36	0.224
NOX	51.9	0.004	0.21	0.13	0.021	1.07	0.660
PM	0.7	0.141	0.10	0.06	0.047	0.03	0.020
NMVOC	0.00309	0.002	0.00	0.00	0.004	0.00	0.000
		Lokaal	0.475	0.29	Lokaal	1.46	0.90
CO2 direct	4.28	0.04	0.17	0.17	0.10	0.43	0.26
CO2 indirect	1.00	0.04	0.04	0.04	0.10	0.10	0.06
	5.28	CO2	0.21	0.21	CO2	0.53	0.33
		TOTAAL	0.69	0.50	TOTAAL	1.99	1.23

Tabel 13: Totale emissiekost nieuwe dieseltrein in €/l en €/vkm

Polluent	Emissies Nieuwe diesel	Lage waardering (FPB, 2012)			Hoge waardering (CE Delft, 2019)		
		€/g	€/vkm	€/l	€/g	€/vkm	€/l
SO2	0	0.008	0.00	0.00	0.017	0.00	0.000
NOX	10.4	0.004	0.04	0.03	0.021	0.21	0.132
PM	0.1	0.141	0.01	0.01	0.047	0.00	0.003
NMVOC	0	0.002	0.00	0.00	0.004	0.00	0.000
		Lokaal	0.056	0.03	Lokaal	0.22	0.14
CO2 direct	3.17	0.04	0.13	0.13	0.10	0.32	0.20
CO2 indirect	0.74	0.04	0.03	0.03	0.10	0.07	0.05
	3.91	CO2	0.16	0.16	CO2	0.39	0.24
		TOTAAL	0.21	0.19	TOTAAL	0.61	0.38

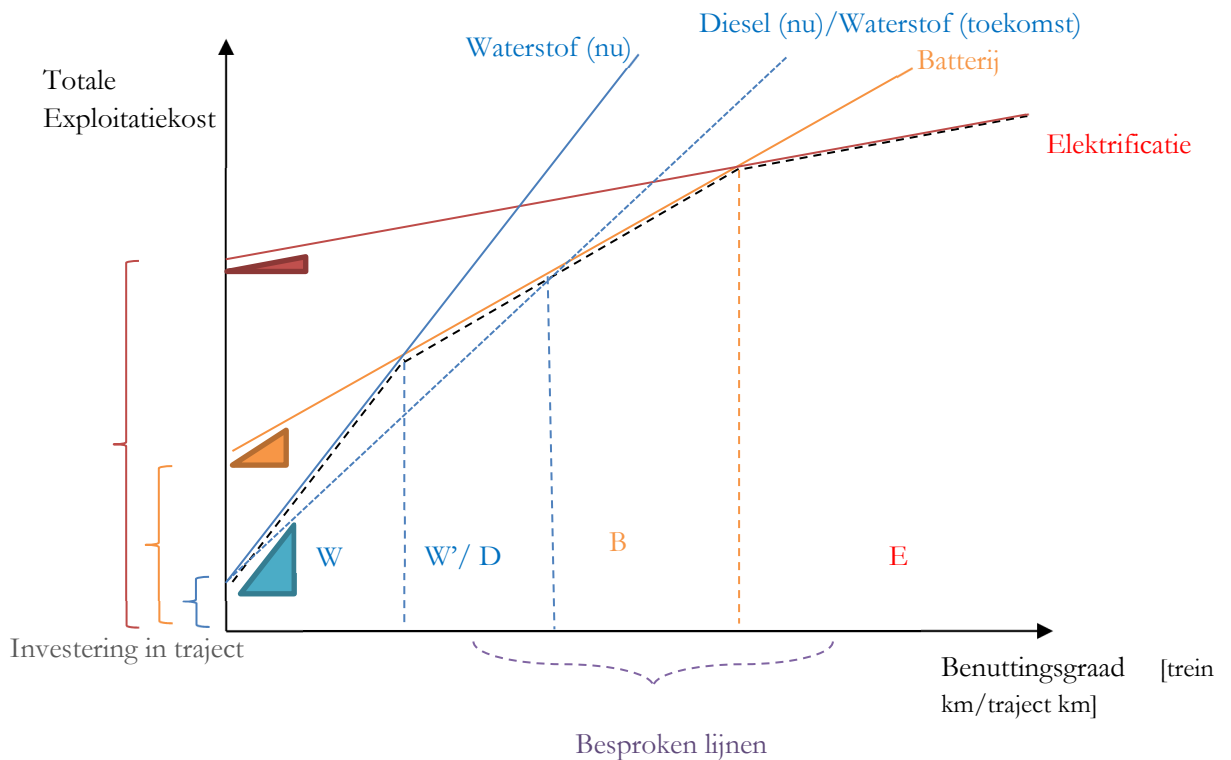
Tabel 14: Indirecte CO2 emissies en emissiekost in €/vkm voor waterstof en elektrische varianten

Type trein	kg/vkm	Laag		Hoog	
		€/kg	€/vkm	€/kg	€/vkm
Waterstof	2.78	0.04	0.11	0.10	0.28
Elektrisch (batterij)	1	0.04	0.04	0.10	0.10
Elektrisch (bovenleiding)	0.85	0.04	0.03	0.10	0.09

We concluderen dat de emissiekosten van de MW41 aanzienlijk zijn, zeker indien wij de hogere waarderingen hanteren die gebruikt worden door DG MOVE. De emissiekosten komen dan neer op respectievelijk €0.69 en €1.99 per voertuigkilometer voor lage/hoge waardering. Voor een nieuw dieselveertuig zal dit waarschijnlijk lager zijn €0.21 en €0.61. Voor de elektrische en waterstof alternatieven nemen we dus geen zero emissiekost aan, door hun indirect impact op energieverbruik. We hanteren een emissiekost tussen €0.11 en €0.28 voor waterstof, €0.04 en €0.1 voor batterijtrein en €0.03 en €0.09 voor een elektrische trein.

6 Theoretische benadering

Alvorens de verschillende lijnen in detail te bespreken, wordt er eerst een theoretische uiteenzetting gemaakt over de voor- en nadelen van de verschillende treintypes per trajecttype. Onderstaande figuur geeft een schematisch overzicht van de exploitatiekost per treintype gerelateerd aan de benuttingsgraad van een bepaald traject. Hierbij is het belangrijk een onderscheid te maken tussen de vaste trajectinvesteringskosten en de variabele kosten, zoals bijvoorbeeld kosten gerelateerd aan brandstof. De totale exploitatiekost staat hierbij op de verticale as, de intensiteit waarmee een bepaald traject wordt gebruikt op de horizontale as. Om de analyse relatief simpel te houden gaan we enkel uit van de exploitatiekost door de operator en netbeheerder, niet van externe kosten voor de maatschappij. Deze zijn natuurlijk lager voor waterstof, batterij en elektrische alternatieven.



Figuur 21: Operationele kost per type technologie – theoretische benadering

De grafiek is opgedeeld in 4 delen: W, W'(D), B en E. Deze stellen respectievelijk de benuttingsgraden voor waarbij respectievelijk dieseltreinen en mogelijk toekomstige waterstofftreinen, dan batterijtreinen en uiteindelijk elektrische treinen met bovenleiding de meest kostenefficiënte technologie vormen. Diesel wordt ook aangeduid op de grafiek, samen met een mogelijk toekomstig scenario voor waterstof (W'/D). Waterstofftreinen nu (aan de huidige prijzen voor waterstof en met de huidige technologie) zijn nog steeds duurder dan dieseltreinen in exploitatiekost. In de nabije toekomst (mogelijk al tegen 2025) zal de exploitatiekost van waterstofftreinen en dieseltreinen ongeveer dezelfde zijn of zelfs iets gunstiger voor de waterstofvariant.

Waterstofftreinen (en dieseltreinen) worden typisch gekenmerkt door lage trajectinvesteringskosten, dat wil zeggen de laagste vaste kost, en hoge variabele kosten. We nemen hierbij wel aan dat de waterstofprijs een omvattende prijs is, die de kosten van de (groene) synthese van waterstof omvat.

Dit verklaart de relatief hoge variabele kosten. Anderzijds is de variabele kost gerelateerd aan waterstof, zeer sterk afhankelijk van het al of niet uitblijven van een waterstofeconomie. Dit zou de prijs kunnen drukken waardoor het scenario van waterstoffreinen in de grafiek opschuift van waterstof (oud) naar waterstof (nieuw). Het scenario waterstof (nieuw) wordt gekenmerkt door een lagere variabel kost, door het goedkoper worden van energiekosten. Hierdoor worden waterstoffreinen een gunstiger alternatief. De nieuwe situatie van waterstof valt, zoals te zien op de grafiek, samen met de huidige dieseltreinen. Deze hebben gelijkaardige kosten door de lage brandstofkost, vergelijkbaar met waterstof in een ideaal geval, en vergelijkbare onderhoudskosten. Diesel treinen rijden eveneens met relatief lage vaste kosten. Bovenleidingen en tractie stations zijn niet immers niet noodzakelijk. Een belangrijk verschil tussen diesel en waterstof is echter dat de milieukosten veel hoger uitvallen voor diesel.

Het ideale waterstofftraject is een relatief lang traject , dat niet intensief gebruikt wordt, met hoge potentiële elektrificatiekosten en tankpunten op begin en einde in industriële zones, gekenmerkt door de aanwezigheid van een goed uitgebouwde waterstofeconomie.

Batterijtreinen hebben een hogere trajectinvesteringskost en een lagere variabele kost dan waterstoffreinen. De hogere trajectinvesteringskost wordt vooral gekenmerkt door de noodzaak om bepaalde stukken van het traject te elektrificeren, om het gebruik van een batterijtrein mogelijk te maken. Als voornaamste voordeel van batterijtreinen ten opzichte van een volledig elektrisch traject, is het mogelijk om met batterijtreinen investeringen te omzeilen in gebieden met een zeer hoge kostprijs van elektrificatie. Zones met veel tunnels, bruggen, nauwe doorgangen, natuurgebieden, steile hellingen en dergelijke meer. Waar we standaard een kost voor het aanleggen van bovenleidingen gebruiken rond €1 miljoen per trajectkilometer (Infrabel cijfers), kan moeilijk terrein voor een enorme inflatie van de kostprijs zorgen.

We tonen dit aan in Figuur 22 op basis van een studie van Baumgartner J.P (2001). Deze geeft weliswaar de totale kost voor het aanleggen van sporen (inclusief bovenleiding) en niet enkel van elektrificatie van bestaande sporen. Hoewel dus niet helemaal vergelijkbaar, geeft dit wel een ruim idee van de mogelijke impact op de kosten. Uit de figuur leiden we af dat trajecten in tunnels gemakkelijk 3 tot 5 keer meer per trajectkilometer kosten. Een betrouwbare inschatting van enkel de elektrificatiekost is niet beschikbaar, maar we kunnen aannemen dat deze kost met ongeveer dezelfde factor kan stijgen. Hetzelfde geldt evenzeer voor uiterst steile of moeilijk toegankelijke gebieden. In natuurgebieden kan het zelfs volstrekt verboden of technisch onhaalbaar zijn om een bovenleiding aan te leggen. Batterijen aan boord van de trein maken het mogelijk deze stukken te overbruggen en zo de kosten van elektrificatie te beperken.

Type of Track	Easy Topography Avg. (range) in M€/km	Average Topography Avg. (range) in M€/km	Difficult Topography Avg. (range) in M€/km
Single 100 km/h	2 (1-3)	5 (3-15)	20 (15-40)
Double 100 km/h	2 (1-4)	7 (3-20)	20 (20-50)
Double 300 km/h	3 (2-6)	10 (6-30)	40 (20-50)

Figuur 22: Totale kosten voor het aanleggen van sporen (totale kost, inclusief aanleggen bovenleiding) in verschillende deelgebieden, Bron: Baumgartner J.P (2001)

Optimaal gezien, zijn hebben de te overbruggen stukken een maximum lengte van 40-50 kilometer en zijn optimaal niet gelegen op een terminus van de desbetreffende lijn (dat zou namelijk vragen om ook nog terug te rijden over een traject zonder bovenleiding). Tussen deze niet-geëlektrificeerde stukken moet minstens 5 kilometer bovenleiding aanwezig zijn, omdat de batterij het snelst oplaadt

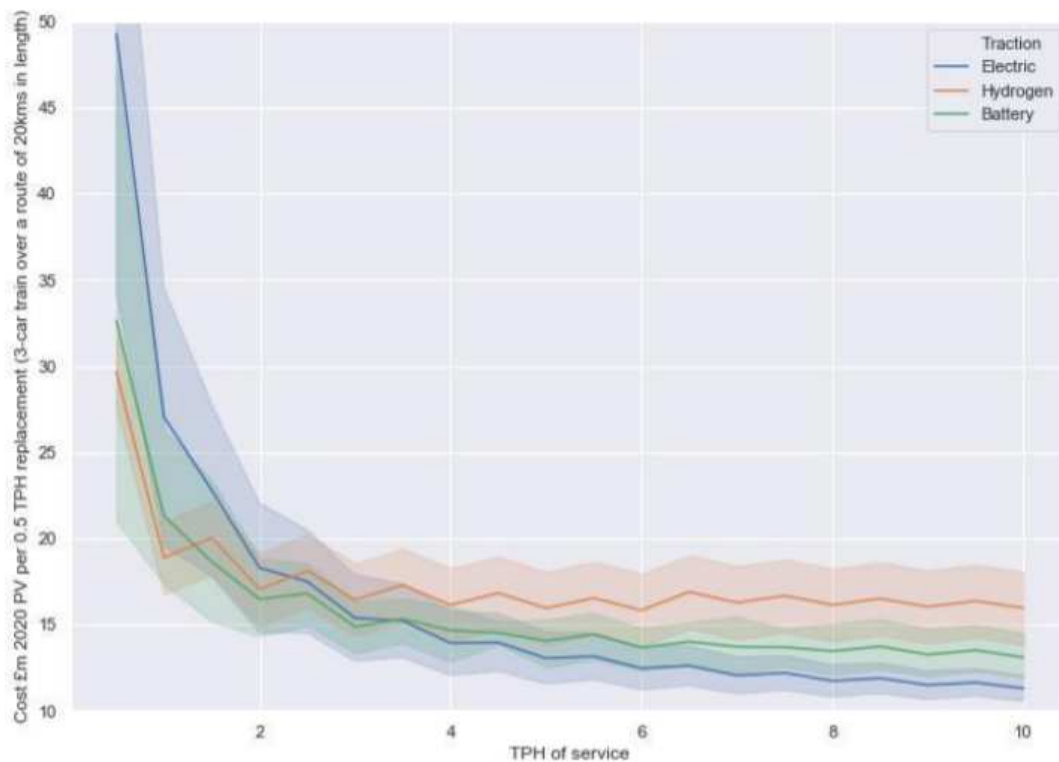
al rijdend, zoals eerder werd aangegeven. De onderstaande figuur geeft op een eenvoudige wijze het ideale traject weer, met in het blauw de geëlektrificeerde stukken en in het rood de stukken zonder elektrische bovenleiding.



Figuur 23 Eenvoudige voorstelling van het ideale traject voor batterijtreinen

Het laatste type traject is het volledige geëlektrificeerde traject. Dit traject heeft de hoogste traject investeringskost, wat logisch te verklaren is door de relatief hoge kost van het elektrificeren van een spoorlijn. Er is immers over het ganse traject een bovenleiding noodzakelijk en verder kan het nodig zijn om nieuwe tractiestations aan te leggen. De variabele kost ligt daarentegen wel laag, door de hoge energie-efficiëntie en lage onderhoudskosten van elektrische treinen. Deze kenmerken zorgen ervoor dat volledige geëlektrificeerde lijnen, qua exploitatiekosten de beste optie zijn op druk bereden trajecten, omdat de hoge traject investeringskost gedragen wordt door meer treinen.

Om dit inzicht nogmaals te illustreren en enigszins in perspectief te plaatsen verwijzen we naar de ‘Traction Decarbonisation Network Strategy’ van Network Rail (2020). Deze omvat een brede evaluatie van ontdieseling van het volledige spoor netwerk in het Verenigd Koninkrijk. Interessant is dat in dit rapport ook de oefening werd gemaakt om de totale kapitaal en operationele kost van de verschillende technologieën naast elkaar te zetten in functie van de frequentie (hieronder in TPH of Train Per Hour) van het gebruik van een 20 kilometer traject. De totale kost van de verschillende technologieën wordt uitgedrukt op de verticale as. Vergelijkbaar met de theoretische uiteenzetting hierboven zien we dat voor weinig intens gebruikte trajecten (<2 treinen/uur) elektrificatie de duurste optie is. Boven een bepaalde frequentie (>4 treinen/uur) is volledige elektrificatie de goedkoopste optie. Gebruik van waterstof heeft de laagste kost enkel voor de zeer weinig intens gebruikte trajecten (≤ 1 trein/uur). De tussenzone die we hierboven aanhaalden voor batterij valt in het domein tussen volledige elektrificatie en waterstofgebruik. Voor intenser gebruikte trajecten is waterstof steeds de duurste optie.



Figuur 24: Totale kost per technologie voor het gebruik van een treinstel bestaande uit 3 elementen op een traject van 20 kilometer, in functie van frequentie (treinen per uur = TPH), Bron: Network Rail, Traction Decarbonisation Strategy

Zoals aangeduid in ligt het grootste deel van de besproken lijnen op een relatief beperkte benuttingsgraad, en rond het snijpunt van de kostencurves van waterstof, batterij en elektrificatie. Dit maakt dat inschattingen per traject zullen moeten uitwijzen wat de respectievelijke beste optie is. De afhankelijkheid van parameters, die gekenmerkt worden door grote onzekerheid, is groot, waardoor het uitvoeren van een grondige sensitiviteitsanalyse cruciaal is.

7 Oplossingen voor goederenvervoer

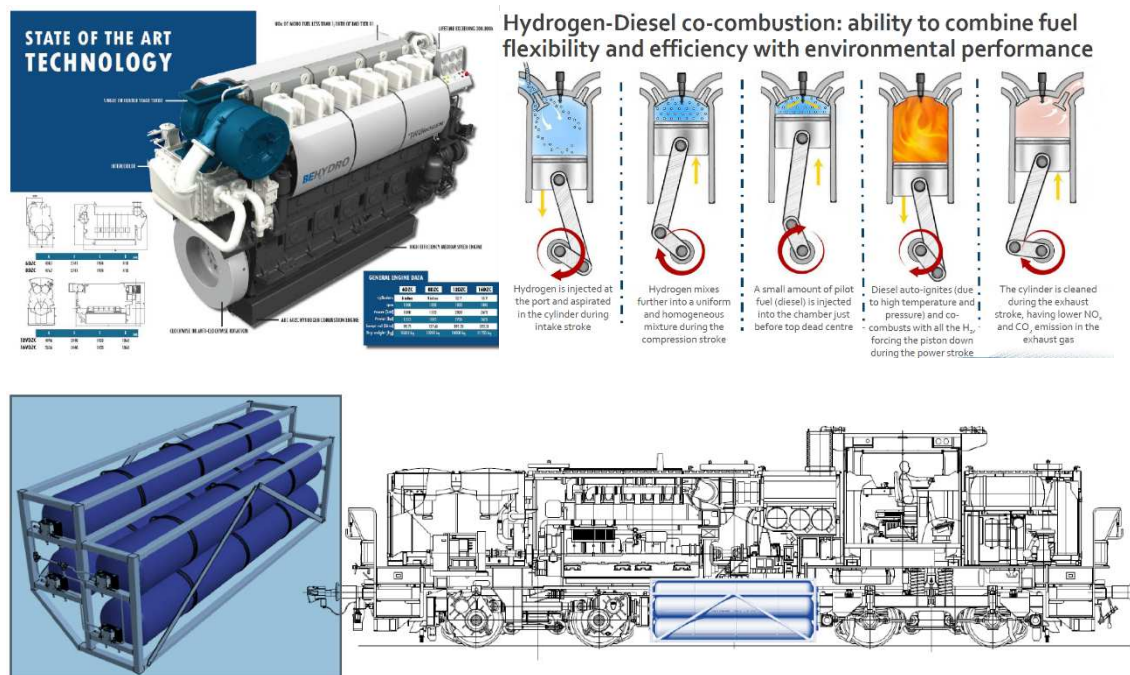
We behandelen in dit hoofdstuk mogelijke oplossingen om het goederenvervoer minder afhankelijk van diesel te maken. De markt voor goederenvervoer is verschillend dan deze van passagierstreinen, die voornamelijk hierboven worden behandeld. Bij gebrek aan een bovenleiding, zelfs op een zeer klein gedeelte van het traject worden nog voornamelijk dieseltreinen ingezet. Dit gaat soms enkel over de last mile, waarbij reguliere dieseltreinen tot 95% (of meer) op geëlektrificeerde trajecten rijden. Dit komt omdat door de hoge 'shunting' kosten of rangeerkosten die nodig zijn om van locomotief te veranderen (elektrisch <-> diesel). Het komt er dus op neer om voldoende stimuli te bieden voor transporteurs om dieselgebruik achterwege te laten, door een aangepaste locomotief te gebruiken of een andere locomotief voor rangering te gebruiken. Aangepaste rijpadtarieven, economische incentives of zelfs een (gedeeltelijk) verbod op het gebruik van dieseltreinen op geëlektrificeerde trajecten kan hier soelaas bieden.

Een haalbare technische oplossing om de trein voldoende flexibiliteit te geven is het gebruik van een diesel-elektrische (hybride) variant. Deze bestaan ondertussen bij verschillende leveranciers. Siemens bracht zo in 2018 een "Vectron dual mode" (diesel/bovenleiding) locomotief op de markt, vooralsnog uitsluitend voor de Duitse markt. Deze gebruikt dan ook de in Duitsland gebruikelijke netspanning van 15kV AC (de ontwikkeling van een versie die ook onder DC-bovenleiding kan rijden, is echter technisch niet meer onrealistisch). De Vectron dual model weegt 90 ton, combineert een elektrische en een dieselmotor en heeft een brandstoftank met 2500 liter diesel aan boord. Deze trein is dus flexibel in gebruik en heeft een voldoende autonomie op diesel om korte tot middellange niet-geëlektrificeerde trajecten te overbruggen. Het voornaamste nadeel van een dergelijke diesel-elektrische locomotief is dat deze nieuw moet aangekocht worden, dat terwijl de marges op goederentransport via spoorwegen vrij klein zijn. Daarnaast is het onderhoud van een gecombineerde diesel-elektrische motor mogelijk duurder dan een gewone dieseltrein en zeker duurder dan een puur elektrische trein. De geboden flexibiliteit van de hybride motor heeft dus wel een prijs, die mogelijk niet afweegt tegen het potentieel beperkte gebruik van de dieselaandrijving.

Een alternatieve mogelijkheid is een goederentrein die een kleine batterijgroep aan boord heeft, die juist volstaan voor rangering of toegang tot een havendok of fabriek. Dit heeft echter een zeer beperkte autonomie en levert geen vol vermogen. Een volledig batterij-elektrische variant voor goederenvervoer is in praktijk moeilijk te realiseren. De reden is dat, verschillend met passagiersrijtuigen, goederenvervoer doorgaans afhankelijk is van een enkele locomotief (of 2 locomotieven). Waar bij passagiersrijtuigen de batterijen mogelijk op het dak van de verschillende stellingen kan gemonteerd worden (zie hierboven in sectie 3.3), zouden deze in goederenvervoer eerder bij de locomotief moeten worden ingebouwd. Dit is praktisch gezien erg moeilijk, omdat dit binnen de restricties van het gewicht en volume van de locomotief moet worden ingepast. Een mogelijke oplossing zou een extra aanhangwagen kunnen zijn met batterijen, toch lijkt het bijkomend gewicht van zo'n oplossing, in functie van de nodige energie dat deze batterijen moeten kunnen leveren op dit moment te restrictief voor operationeel gebruik. De gemiddelde goederentrein vervoert immers gemakkelijk 400 tot 500 ton aan goederen, voor een totaal bruto gewicht (inclusief locomotief en aanhangwagens) van 1200 tot 2000 ton. Ter vergelijking, we spreken in sectie 3.3 van passagiersrijtuigen met een gewicht tussen 100 en 200 ton. Het gewicht van de batterijen dat men theoretisch gezien zou moeten meenemen bedraagt dus gemakkelijk het tienvoudige van deze van de passagierstrein, met een beperkte actieradius (40-80 km) en mogelijk zeer lange laadtijden.

Daarom wordt in goederenvervoer (zowel voor weg als spoorvervoer) meer naar waterstof gekeken om het transport te verduurzamen en van dieselgebruik af te stappen. Het voordeel van waterstof is dat het een veel grotere energiedensiteit (120 MJ/kg of 2.80 MJ/l²⁰) heeft dan de huidige accu's (0.6 MJ/kg of 1.5 MJ/l) en niet afhankelijk is van lange laadtijden. Ter vergelijking, voor diesel is dit (43 MJ/kg of 35.8 MJ/l).

Bij het zware goederenvervoer via trein kan het bovendien erg interessant zijn om rechtstreekse injectie van waterstof in een (omgebouwde) klassieke verbrandingsmotor toe te passen. We vermijden hierbij het gebruik van kwetsbare en onderhoudsgevoelige brandstofcellen. Bovendien blijkt dat de efficiëntie van waterstofverbranding in de klassieke hoge vermogensmotors nodig voor zwaar goederenvervoer (treinen en schepen) erg gunstig uitvalt. Zo kan de efficiëntie al 43% bedragen en tot 70% met recuperatie van warmte-energie. Dit is vergelijkbaar en zelfs beter dan brandstofcellen. Het proefproject BeHydro ontwikkelde een dual fuel / hybride motor die tot 80% van zijn energie uit waterstof kan halen. Deze motor gebruikt dus nog diesel (hij is dus niet volledig groen), maar stoot nog steeds veel minder CO₂ (65-85% minder) en andere pollutanten uit (Figuur 25). Er wordt enkel nog diesel gebruikt voor piloot injectie, en deze kan men ook vervangen door bio fuels zoals BtL (Biomass to liquid), HVO (Hydrotreated Vegetable Oil), etc... Het gedeelte CO₂ emissies kan dan als carbon neutral beschouwd worden.



Figuur 25: Be-Hydro hybride diesel/waterstof motor - Bron: BeHydro/Anglo Belgian Corporation & CMB

BeHydro, een consortium van rederij CMB en de Anglo Belgian Corporation ontwikkelden een proces waarbij de in België veel gebruikte HLD77/78 locomotief tegen een aanvaardbare kost kan worden omgebouwd tot een dual fuel motor. Dit geeft dus het voordeel dat er geen nieuwe locomotief moet worden aangeschaft. Hierbij wordt één van de twee dieseltanks (ongeveer 2000l) vervangen door waterstoftanks (met in totaal 30 kg waterstof opslag, ongeveer het energie-equivalent van 100l diesel en een besparing van ong. 300 kg CO₂ per tankbeurt). Het interessante van het ontwikkelde procedé is dat er nog steeds automatisch kan overgeschakeld worden naar diesel indien er geen waterstof beschikbaar is. Daarmee is de technologie enigszins vergelijkbaar met een hybride

²⁰ Bij een druk van 35 MPA of 350 bar.

aandrijving op aardgas (LNG/CNG). Het voornaamste nadeel is de daling in autonomie van de trein, gezien het beperktere bereik (10x kleiner) die waterstof geeft voor hetzelfde volume als diesel. Waar een volle dieseltank de trein een autonomie tot 1000 km kan geven, zal waterstof een autonomie van maximum 100 km geven. In praktijk kan dit nog een stuk lager zijn, afhankelijk van de belading van de goederentrein. Als de trein op waterstof rijdt moet deze dus zeer regelmatig bijgetankt worden. Daarnaast heeft deze trein nog steeds diesel nodig, hoewel significant minder. Een monofuel versie van de motor die ook 100% op waterstof kan lopen is nog in ontwikkeling. Met deze versie kunnen de twee dieseltanks vervangen worden door waterstoftanks (met in totaal 60 kg waterstof opslag). De voordelen zijn dan de veel lagere emissies : geen CO₂ uitstoot meer, bijna geen roet en een zeer lage NO_x uitstoot, en een grotere autonomie t.o.v. de dual fuel versie met de halve waterstof opslag.

De dual fuel oplossing laat ook toe om de infrastructuur voor waterstof te laten ontwikkelen, wat nog jaren zal duren voordat deze op het niveau is dat men monofuel oplossingen in de praktijk kan gebruiken. Op deze manier kan men de “kip en ei” situatie doorbreken. Een eerste stap in deze infrastructuur ontwikkeling is de mobiele vultrailer die CMB in 2021 introduceert : hiermee kan men verschillende applicaties vullen tot 350bar, ook langs het spoor. Dit principe wordt trouwens ook gebruikt om de Alstom iLint trein in Nederland bij te vullen. Doordat de trailer niet blijft staan, is het een vrij eenvoudig vergunningstraject. Een conversie project van een HLD77/78 locomotief zou bovendien toelaten om stapsgewijs kennis en ervaring met waterstof op het vlak van operaties, onderhoud en infrastructuur uit te breiden bij alle betrokken stakeholders om in de toekomst juiste en gefundeerde beslissingen te kunnen nemen. Dit is een concreet project dat op korte termijn gerealiseerd kan worden (omwille van de beperkte ombouw en de reeds bestaande dual fuel motor oplossing) en draagt ook bij tot de groene energietransitie van de Belgische spoorwegen op niet-geëlektrificeerde lijnen in het kader van duurzame mobiliteit. BeHydro is bereid om dit conversie project vol te ondersteunen.

De ontwikkelingen door BeHydro zijn grensverleggend te noemen en kunnen enkel toegejuicht worden. Toch moeten we hier nog nuchter naar blijven kijken. De beperkte autonomie die waterstof geeft ten opzichte van diesel blijft een probleem. De voornaamste hindernis hier is niet de energiedensiteit per gewicht (zoals bij batterijen), maar de energiedensiteit per volume (zie ook hierboven). Voor langere afstanden blijft de omgebouwde locomotief dus sterk afhankelijk van diesel. Het is immers onwaarschijnlijk dat men elke 50 tot 100 kilometer waterstof kan tanken. Het is enkel voor profielen met kortere afstanden (bijvoorbeeld regelmatig vervoer binnen de haven), waarbij de trein regelmatig kan worden bijgevuld met waterstof dat het gebruik van diesel grotendeels kan worden vermeden. Dit is in praktijk vrij vergelijkbaar met hedendaagse hybride passagiersvoertuigen met een autonomie van rond 40-50 kilometer. Deze hebben ook een gunstig emissieprofiel, indien ze veel korte trips maken en vaak herladen. Voor shunting operaties, die typisch in de omgeving van één locatie gebeuren, vormt het frequenter tanken van waterstof minder een probleem gezien de nabijheid van één tankstation voldoende is. Voor mainline operaties, die over grotere afstanden gaan, kan een extra tankwagon direct achter de locomotief aan de goederentrein toegevoegd worden waardoor een veel groter volume waterstof (ca. 1 ton gecompriëerde waterstof) kan meegenomen worden. Dit is uiteraard moeilijk toepasbaar bij shunting operaties, maar ook minder noodzakelijk (zoals vermeld).

We kunnen hier geen uitgebreide kosten-baten analyse bij maken. We weten wel dat er voor elke waterstoftank van 25-30kg ongeveer 100l diesel kan bespaard worden. Dit is het equivalent van 326 kg CO₂ emissies (2.64kg CO₂/l diesel directe emissies en 0.62kg CO₂/l diesel via raffinage en transport). Uit de vergelijking met de MW41 weten we echter dat de elektrolyse van waterstof erg veel energie vraagt. Volgen we onze assumpties uit paragraaf 5.6 dan mogen we maar 47% van deze

daling in CO2 meerekenen, gezien de mogelijke indirecte emissies door de lagere energie efficiëntie van waterstof. Daarnaast zijn er belangrijke dalingen in lokale emissies van fijn stof en NOx. De emissies van deze laatste zijn echter zeer afhankelijk van het type motor. De motor in de HLD77 is de ABC 6DZC. Deze is qua emissies, ten opzichte van vermogen, gelijkaardig met de Cummins motor in de MW41, maar stoot iets meer dan een derde meer NOx en fijn stof uit per eenheid vermogen, want de ABC 6DZC motor was reeds gehomologeerd in 1998 volgens de toen geldende emissie normen.

Tabel 15: Emissies in g/kWh voor MW41 en HLD77 treintypes -Bron: EMMOSS emissie model

stof	HLD77	MW41
CO	0.73	1.07
FC	239.40	239.40
NOx	11.70	8.74
TSP	0.20	0.15

Passen we dit toe op de emissies van de MW41 (Tabel 12) en herrekenen we, dan komen we voor elke 100l diesel die kan worden vervangen door waterstof op een potentiële baat tussen €46 en €129 (afhankelijk van de gebruikte waardering - Tabel 16). We geven hierbij ook de energiekost van diesel ten opzichte van een projectie van waterstof met €5/kg en €2/kg. De vergelijking met diesel is paritair bij €2/kg.

Tabel 16: Potentiële emissiebatens door gebruik waterstof in HLD77

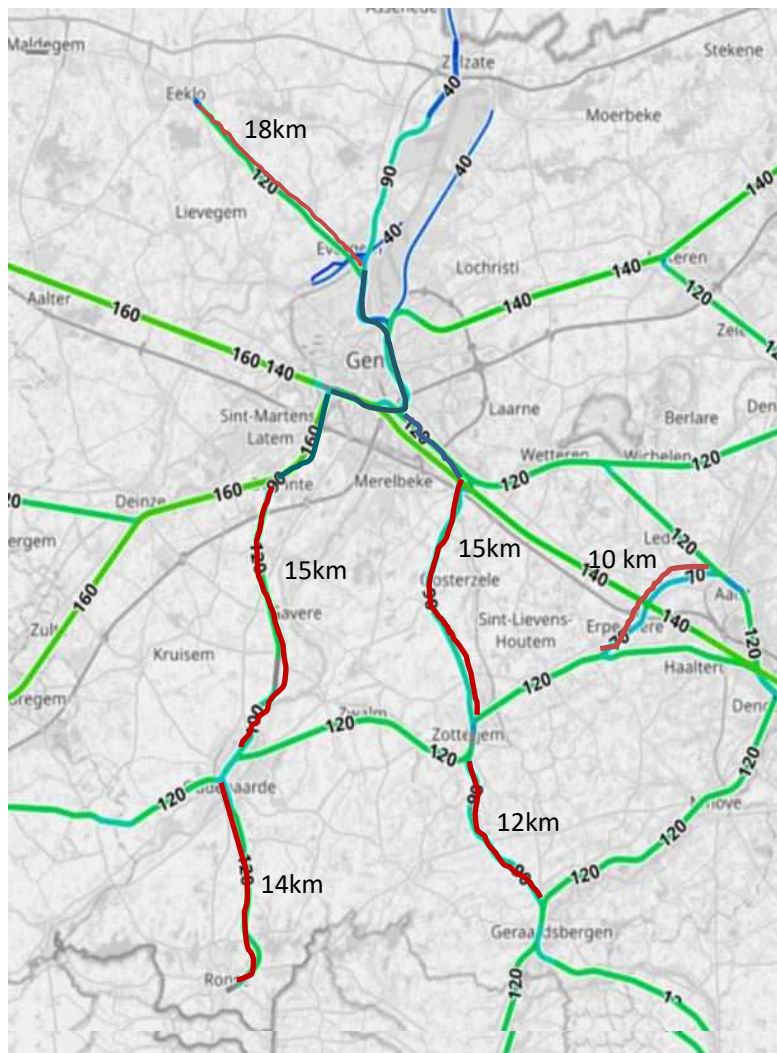
Vermeden dieselgebruik (l)	Energiekost diesel (€/l)	Energiekost waterstof (€5/kg)	Energiekost waterstof (€2/kg)	Lage waardering (FPB,2012)	Hoge waardering (CE Delft, 2019)
1	0.50 €	1.25 €	0.50 €	0.46 €	1.29 €
100	5 000 €	12 500 €	5 000 €	46 €	129 €
10 000	25 000 €	62 500 €	25 000 €	4 587 €	12 883 €
50 000	50 000 €	125 000 €	50 000 €	22 933 €	64 415 €
100 000	0.50 €	1.25 €	0.50 €	45 865 €	128 830 €

Uit Tabel 16 komen relatief hoge potentiële milieubaten, naarmate de locomotief(ven) meer dieselvebruik kunnen vermijden. Daarnaast zijn de energiekosten gelijkaardig met deze van diesel bij een waterstofprijs van €2/kg. De voornaamste hindernis hier is, zoals eerder gezegd, de mogelijkheid om genoeg waterstof mee te kunnen vervoeren. Hier zijn twee realistische technische opties, die beide echter nog niet volledig op punt staan. De eerste is het gebruik van vloeibaar waterstof, dat tot 7x hogere energiedensiteit per volume heeft. Dit is echter moeilijker hanteerbaar en kan, in tegenstelling tot gecompriemd waterstof, niet direct door de motor gebruikt worden. Een tweede mogelijkheid is een aanhangwagen bij de locomotief, die specifiek is omgebouwd om gecompriemd waterstof te transporteren. Beide mogelijkheden worden nu intensief onderzocht.

8 Overzicht van te elektrificeren lijnen

8.1 Situering

8.1.1 Cluster Gent



Figuur 26: Overzicht van niet-geëlektrificeerde lijnen rond Gent

In de rest van het rapport beschouwen we de niet-geëlektrificeerde lijnen rond Gent als de ‘cluster Gent’. Deze bestaat uit de verbindingen tussen Eeklo en Ronse, Gent en Geraardsbergen en de verbinding Aalst-Burst.

Eeklo-Ronse (L58 & L86) – Elektrificatie en batterijtrein investeringskost

We bekijken eerst de verbinding Eeklo-Ronse. Deze combineert Lijn 58: Eeklo-Gent en Lijn 86 De Pinte -Ronse. Bekijken we dit traject als een geheel dan gaat dit over een niet-geëlektrificeerde lijn van 18 kilometer tot Evergem, waarna ze overgaat op een geëlektrificeerd deel tot De Pinte. Vanaf De Pinte tot Ronse rijdt ze over een niet-elektrisch deel, met uitzondering van een traject van ongeveer 2 km rond Oudenaarde. Op de relatie “S51” is ieder uur een trein per richting, 18 uren per etmaal op weekdays, 15 uren per etmaal op weekenddagen en feestdagen. Als we afronden op per jaar 110 weekenddagen + feestdagen en 255 weekdays dan zijn dat in totaal 12480 treinen per jaar of ongeveer 812.000 (commerciële) kilometers per jaar op basis van dit schema. Dit kan echter

misleitend zijn. Wat relevant is voor de MKBA en ook doorheen de verdere analyse zal gebruikt worden, is het totale aantal effectief gereden treinkilometers. Dit kan sterk verschillen. Voor Eeklo-Ronse is het totale aantal treinkilometers op dit traject 2 195 295 kilometer. Dit houdt rekening met de extra kilometers nodig om (per uur) verbindingen te voorzien, de samenstelling van de treinen en extra kilometers voor onderhoud, tanken en rangering. Daarmee is het de meest intensief gebruikte niet-geëlektrificeerde traject van België voor personenvervoer.

De kosten voor elektrificatie van de L58 Gent-Eeklo werden in 2015 ingeschat op €17 miljoen. De kosten van het traject L86 bedroegen €22.5 miljoen euro. Dat is samen €39.5 miljoen. We schatten de totale kost voor 2025 in op €48.1 miljoen, wat rekening houdt met 2% inflatie per jaar sinds 2015. Twee andere opties zijn om de initiële trajectinvesteringen te beperken door batterijtreinen of waterstoffreinen in te zetten. Voor batterijtreinen ligt het effectieve operationele bereik rond 60 kilometer, doordat batterijen het best op een bepaald ladingsniveau kunnen gebruikt worden, om de levensduur te maximaliseren. Het niet-geëlektrificeerde tussen De Pinte en Ronse bedraagt heen en terug ook ongeveer 60 km. In niet-ideale omstandigheden, er kan hier bijvoorbeeld gedacht worden aan ongunstige weersomstandigheden, is het twijfelachtig dat een batterijtrein dit traject zal kunnen overbruggen zonder problemen. Om dit te verhelpen, lijken de volgende twee opties het meest geschikt:

1. Laadinfrastructuur voorzien op het einde van het enkel traject in Ronse. Dit maakt het mogelijk om de batterij tegen een hogere laadstroom op te laden. Al zal bij het opstellen van de dienstregeling de 10 minuten laadtijd wel in rekening gebracht moeten worden. De kostprijs van de laadinfrastructuur wordt geschat op ongeveer €10 miljoen.
2. Elektriciseren van het deeltraject tussen De Pinte en Oudenaarde. Dit maakt het mogelijk om tijdens de rit tegen een hoge laadstroom op te laden. De batterijtrein kan het traject dan zonder extra benodigde laadtijd afleggen. Bijgevolg blijven de consequenties op de dienstregeling beperkt.

Het alternatief van waterstoffreinen op dit traject zal op het einde van dit hoofdstuk besproken worden voor de gehele Gentse cluster.

Gent-Geraardsbergen (L122) – Elektrificatie en batterijtrein investeringskost

Spoorlijn 122 verbindt Melle met Geraardsbergen. Het traject heeft een lengte van 28.5 kilometer. Er zijn al tractie onderstations aanwezig in Gent, Melle en Zottegem. In totaal is er ongeveer 26.6 kilometer niet-geëlektrificeerd dubbelspoor. Op de relatie “S52” is ieder uur een trein per richting, 18 uren per etmaal op weekdays, 16 uren per etmaal op weekenddagen en feestdagen. Treinen richting Geraardsbergen vertrekken 5 min na het uur en doen 50 minuten over het traject. Treinen richting Gent-Sint-Pieters vertrekken 6 min na het uur en doen er 51 minuten over. Als we afronden op per jaar 110 weekenddagen + feestdagen en 255 weekdays dan zijn dat in totaal $(18*255+16*110)*2=12660$ treinen per jaar of ca 460.000 commerciële kilometers per jaar. We rekenen echter met een **totaal van 625.000 treinkilometers.**

Voor mogelijke elektrificatie van lijn 122 kan gebruik gemaakt worden van de bestaande onderstations van Zottegem en Melle en het voorziene onderstation van Geraardsbergen. Afhankelijk van de voorziene trafiek kan het eventueel nodig zijn om een sectioneerpost tussen de onderstations te zetten. Indien enkel de huidige trafiek wordt omgezet naar elektrische tractie, dan is dit niet nodig. De kostenraming van Infrabel voor de lijn is 0.8 miljoen euro/km dubbelspoor voor 29 kilometer. Dit geeft een initiële inschatting van de kost van elektrificatie aan 23.3 miljoen euro in 2015. **Wij**

zullen voor 2025 de kost inschatten op 28.4 miljoen euro, wat rekening houdt met 2% inflatie per jaar sinds 2015.

Een alternatief voor elektrificatie is hier, net als in de andere situaties, het inzetten van waterstoffreinen of batterijtreinen. De investeringen aan het traject gerelateerd aan batterijtreinen zijn in dit specifieke geval beperkt, aangezien het traject een lengte heeft die binnen het effectieve operationele bereik valt van een batterijtrein. Ook zijn er laadmogelijkheden op de reeds geëlektrificeerde delen ter hoogte van Geraardsbergen en Zottegem. Hier kan tegen een hoge laadstroom al rijdend worden opgeladen.

Aalst-Burst (L82) – Elektrificatie en batterijtrein investeringskost

Dit is een beperkt gebruikte lijn, met een uiterst bescheiden aantal verbindingen. De motorwagens bedienen enkel p-treinen: slechts 7 treinen per richting per etmaal op 189 weekdays want niet tijdens de schoolvakanties en geen treinen op alle andere dagen $7 \cdot 189 \cdot 2 = 2646$ treinen per jaar of 27.840 reizigerskilometers per jaar. **We rekenen met 37 566 effectieve treinkilometers.**

De geschatte kost voor elektrificatie van de lijn is €8.5 miljoen, op basis van een inschatting van €7 miljoen door Infrabel in 2015.

Uit de theoretische oefening volgt dat bij laag benutte lijnen elektrificatie niet altijd de beste optie is. Opnieuw zijn er dus enkele alternatieven voor elektrificatie denkbaar op dit traject. Het betreft hier een traject waarop een piekurtrein in een korte periode verschillende malen heen en terug rijdt. De afgelegde afstand valt bijgevolg niet binnen het effectieve operationele rijbereik van een batterijtrein. De volgende oplossingen zijn hiervoor relevant:

1. De installatie van laadinfrastructuur ofwel in Aalst ofwel in Burst. Deze kost is echter even hoog als de volledige elektrificatie van dit traject en schommelt dus rond de €8 miljoen. Omdat het opladen enige tijd in beslag neemt, zal ook gesleuteld moeten worden aan de dienstregeling.
2. Een andere optie is het uitvoeren van extra kilometers over een geëlektrificeerd traject. De batterij kan hier opladen tegen een hoge laadstroom. Er zijn bijgevolg geen extra investeringskosten aan het traject noodzakelijk. Wel, geldt hier dezelfde opmerking als voorheen: het aanpassen van de dienstregeling is noodzakelijk door de langere reistijd, als gevolg van de extra treinkilometers.

Omdat Aalst-Burst slechts een zeer kort en weinig gebruikt traject is, is het moeilijk om investeringen in alternatieven voor volledige elektrificatie mee te nemen. We gaan ervan uit dat deze enkel relevant zijn indien men deze combineert met een duurzame oplossing voor een ander traject. Aalst-Burst is een té kleine verbinding om zelf de kosten van oplaadinfrastructuur of een tankstation voor waterstof te dragen. Indien er dus niet voor volledige elektrificatie van Aalst-Burst wordt gekozen, gaan we ervan uit dat men optie 2) kiest in het geval van de batterijtrein (partiële elektrificatie) en dus niet in het traject investeert. Indien een waterstoffrein wordt gebruikt, nemen we aan dat Aalst-Burst hier bestaande infrastructuur van andere lijnen zal gebruiken. Aalst-Burst mag dus niet als een eiland in het netwerk beschouwd worden.

Cluster Gent – Waterstoffreinen investeringskost

Zoals reeds aangehaald is er naast het alternatief van elektrificatie en batterijtreinen ook een derde optie. Het gebied rond Gent met niet-geëlektrificeerde trajecten leent zich goed tot het inzetten van waterstoffreinen. Dit type treinen verbruikt ongeveer 0.25 kg waterstof per treinkilometer. Rekening

gehouden met het aantal af te leggen kilometers, schommelt het totaalverbruik rond 2000 à 3000 kg waterstof per dag. Met de capaciteit van de waterstoftank in het achterhoofd, moeten tussen de 5 en 8 treinen per dag worden bijgetankt en mogelijk meer. Hiervoor zijn tankstations nodig in de Gentse cluster, in vaste of mobiele vorm. Een strategische locatie voor de vaste tankstations is ofwel in Melle of dichtbij de haven van Gent, omdat er plannen zijn om er in de toekomst een waterstofeconomie uit te bouwen. Het meest opportuun op korte termijn lijkt echter het gebruik van mobiele tankstations op een trailer. De volgende tabel toont de capaciteit en het aantal benodigde passages per dag om de waterstoffreinen te bevoorraden per voertuig en opslagvorm.

Tabel 17: Waterstofcapaciteit en aantal benodigde passages per dag ter bevoorrading van waterstoffreinen per voertuigcategorie en opslagvorm

Transport waterstof	Capaciteit truck	# passages	
		Min	Max
Gecomprimeerd waterstof	350 kg	5.59	8.16
Waterstof hoge druk	1000 kg	1.96	2.86
Vloeibaar waterstof	2500 kg	0.78	1.14
	Capaciteit spoor	Min	Max
Gecomprimeerd waterstof	14 000 kg	0.14	0.20
Vloeibaar waterstof	100 000 kg	0.02	0.03

Voor een vrachtwagen ligt het gemiddeld aantal noodzakelijke bevoorradingen tussen 2 en 8 per dag. Voor een trein is dit lager en volstaat één passage per week. De varianten met vloeibaar waterstof vereisen minder passages, maar zijn op dit moment geen alternatief. De private kost en externe kost van deze bevoorradingen wordt weergegeven in de volgende twee tabellen per categorie.

Tabel 18: Private kost per categorie

Modus en belading		Private kost /jaar	
Truck	Belading	Min	Max
Gecomprimeerd	250 kg	99 305 €	119 166 €
	1000 kg	34 757 €	41 708 €
Vloeibaar	10000 kg	13 903 €	16 683 €
Spoor	Belading	Min	Max
Gecomprimeerd	2500 kg	62 233 €	74 679 €
Vloeibaar	100000 kg	8 713 €	10 455 €

Tabel 19: Externe kost per categorie

Modus en belading		Externe kost /jaar	
Truck	Belading	Min	Max
Gecomprimeerd	250 kg	23 803 €	28 563 €
	1000 kg	8 331 €	9 997 €
Vloeibaar	10000 kg	3 332 €	3 999 €
Spoor	Belading	Min	Max
Gecomprimeerd	2500 kg	11 708 €	14 050 €
Vloeibaar	100000 kg	1 639 €	1 967 €

De totale kost van bevoorrading om het gebruik van waterstofreinen mogelijk te maken bedraagt tot €150 000 per jaar. Deze kost omvat zowel private als externe kosten. Het toont aan dat er steeds rekening zal moeten gehouden worden met de extra kosten gekoppeld aan de bevoorrading van waterstof tankstations.

8.1.2 Charleroi-Couvin



Figuur 27: Overzicht Charleroi-Couvin

Charleroi-Couvin (L132 -L134)

De motorwagens bedienen de relatie “S64” + enkele P-treinen: ieder uur een trein per richting, 20 uren per etmaal op weekdays, 8 uren per etmaal op weekenddagen en feestdagen. Als we afronden op per jaar 110 weekenddagen + feestdagen en 255 weekdays dan zijn dat in totaal $(20 \cdot 255 + 8 \cdot 110) \cdot 2 = 11960$ treinen per jaar of ca 650.000 trein-km per jaar. **Het effectieve aantal treinkilometers is 1 283 233 kilometers.**

De geschatte elektrificatiekost van de lijn Charleroi-Couvin is €49.7 miljoen in 2025, op basis van een inschatting van €40.8 miljoen in 2015 door Infrabel. Door de aanwezigheid van enkele nauwe tunnels op het traject is hier wel een mogelijkheid dat de kosten hoger zullen uitvallen bij uitvoering van het project.

Het eerste andere alternatief is een batterijtrein die het traject zal aandoen. De enkele lengte bedraagt 53 kilometer en valt daarmee binnen het effectieve operationele bereik van 57 km dat de huidige batterijtreinen aankunnen. Het zal dus net haalbaar zijn om van Charleroi tot Couvin te geraken, terug

is echter geen optie zonder aanpassingen aan het traject. De meest realistische optie lijkt hier het plaatsen van laadinfrastructuur in Couvin met een geschatte kost van €7 tot €10 miljoen. Daarnaast zal ook een deeltraject moeten geëlektrificeerd worden om de laadtijd in het station Couvin te beperken, en zo een zo min mogelijke aanpassing aan de dienstregeling te bekomen. Een mogelijkheid is elektrificatie tot Walcourt, een traject van bijna 20 kilometer. Een andere mogelijkheid is om een gedeelte van het (enkelvoudig) traject te elektrificeren op plaatsen waar dit gemakkelijk zou kunnen tussen Philippeville en Couvin. Dit terrein is echter minder eenvoudig.

Een tweede alternatief is het inzetten van een waterstoffrein. De plannen om een industriële waterstofeconomie op te zetten in de nabijheid van deze lijn, lijken beperkt. Hierdoor is een bevoorrading van tankstations door nabijgelegen industrie niet relevant. Bijgevolg, zal plaatselijke synthese hiervoor moeten instaan. De treinen op Charleroi-Couvin doen nu jaarlijks meer dan 1.2 miljoen treinkilometers. Dan betekent een waterstofverbruik van meer dan 300 000 kg per jaar. Nemen we hier als richtlijn een lokale synthese van 1000 kg/dag groene waterstof. De synthese van waterstof vraagt ongeveer 48 kWh/kg of een totaal verbruik van 14 400 MWh. In dat geval is het plaatsen van minstens één tankstation, twee windturbines (6MWh) en een elektrolyser noodzakelijk. De kost van de elektrolyser en de windturbines zit verwerkt in de kostprijs van de groene waterstof, waardoor deze prijs stijgt naar €5 tot €8 per kilogram voor de genoemde lijn. De kost van het tankstation wordt wel apart bekeken en wordt meegenomen als een traject investeringskost om dubbeltellingen te vermijden.

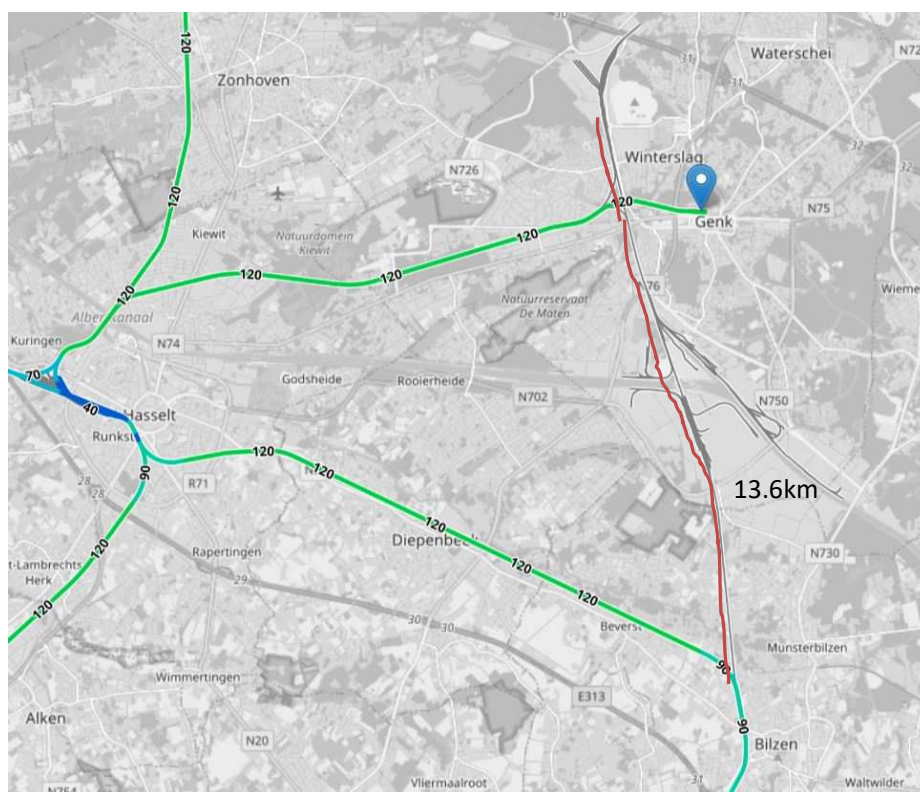
Een interessant initiatief in Charleroi, dat we hier graag vermelden, is het recente project 'waste-to-wheels' dat werd opgezet in een samenwerking van de Waalse overheid met Engie, Tibi en Sotradia. Tibi is een afvalverwerkend bedrijf dat nu 25 800 MWh, maar in de toekomst tot 45 000 MWh aan elektriciteit zal produceren uit huishoudafval. Een deel van deze elektriciteit zal worden omgezet naar waterstof, om een vloot waterstofbussen van de TEC te voorzien van brandstof. Indien de waterstofproductie hier zou kunnen opgeschaald worden, zou dit misschien een optie voor de waterstoffrein kunnen worden. Het probleem van de hoge energiekost van de waterstoffrein is hiermee echter mogelijk niet opgelost. Dit vraagt verder onderzoek en valt buiten het bestek en reikwijdte van deze studie.

8.1.3 Goederenvervoer op niet-geëlektrificeerde lijnen

Genk-Bilzen (L21C)

De lijn Genk-Bilzen is een enkelsporige spoorlijn van 13.6 kilometer die Bilzen en Genk met elkaar verbindt. Ze loopt voort in de (grotendeels opgeheven) lijn 21A en in enkele specifieke industrielijnen (L230, L231 en L232²¹). De lijn kent een lage bezetting van ongeveer 3 treinpassages per dag. We gaan uit van een totaal aantal werkdagen gelijk aan 250. Dit betekent een totaal aantal kilometers over dit traject gelijk aan $13.6 \times 3 \times 250 = 10200$ effectieve treinkilometers. Doordat deze lijn niet geëlektrificeerd is, moet elektrisch goederenvervoer via Genk omrijden. Dit wordt geraamd op ongeveer 60 treinen per dag. De lijn staat op de shortlist voor elektrificatie. De kosten worden door Infrabel geraamd op 12.9 miljoen euro in 2020.

²¹ Deze lijn is momenteel buiten gebruik



Figuur 28: L21 C Genk-Bilzen + Bocht L21A

Elektrificatie van de lijn 21C heeft een aantal belangrijke voordelen:

Op korte termijn biedt de elektrificatie van de lijn (en de bocht 21A) belangrijke voordelen bij de elektrificatie van de lijn Mol-Hasselt. Zo maakt deze het mogelijk om een omleidingsroute te maken voor elektrische goederentreinen.

Op langere termijn leidt de elektrificatie van de lijn tot aanzienlijke tijdswinsten voor (elektrisch aangedreven) goederenverkeer tussen station Genk-goederen en Duitsland, doordat de rondrit rond Hasselt kan vermeden worden. Dit is in praktijk een rondrit van bijna 30 kilometer, wat (door het passeren van meerdere wissels en interactie met passagiersverkeer) tot 40 minuten langer kan duren. Door de elektrificatie wordt dus ook de bottleneck voor reizigersverkeer rond Hasselt ontlast.

Dit wordt verder uitgewerkt in hoofdstuk 10.

8.1.4 Goederenvervoer haven Gent-Terneuzen

Gent-Zelzate (L204)

Spoorlijn 204 loopt tussen Gent en Zelzate op de Oostoever van het kanaal. De lijn heeft een lengte van 17,1 km, grotendeels enkelspoor op enkele delen na, en is momenteel niet in gebruik voor personenvervoer. Er rijden slechts enkele goederentreinen over deze lijn. In 2017 keurde de federale regering een bedrag ter waarde van €11 miljoen voor de uitvoering van enkele haalbaarheidsstudies om de spoorweginfrastructuur in het havengebied op te waarderen. Uit cijfers van Infrabel die betrekking hebben op het goederenvervoer over deze sporen blijkt dat er in 2016 6600 passages waren over dit traject op werkdagen. Het aantal passages op weekenddagen was gelijk aan 612. Dit brengt het totaal aantal passages op dit traject op 7212 in 2016. Het is gerechtvaardigd de cijfers te

extrapoleren naar 2020. Het totaal aantal treinkilometers op lijn 204 komt dan op $7212 \times 17,1\text{km} = 123\ 325,2\ \text{km}$.

De kostprijs voor elektrificatie werd geschat op €0.4 miljoen per kilometer enkel spoor. De lijn bestaat zoals eerder aangegeven voornamelijk uit enkelspoor op enkele delen na. Het is dus gerechtvaardigd voor de berekening van de investeringskost in bovenleiding ervan uit te gaan dat de lijn over het volledige traject uit enkelspoor bestaat. Dit leidt tot een elektrificatie kost van €6.84 miljoen. Daarbovenop komt de kost van een benodigd tractie-onderstation. Deze wordt geraamd op €8 miljoen per post. De studie van Goudappel-Coffeng geeft aan dat er per 20km bovenleiding, één station vereist is. Bijgevolg zal in deze inschatting aangenomen worden dat één station volstaat. Dit brengt de totale kost voor elektrificatie van dit traject op €14.84 miljoen.

Wondelgem – Terneuzen (L55)

Op de westoever kan hetzelfde gedaan worden voor lijn 55 die loopt tussen Wondelgem en Terneuzen. Het traject heeft een lengte van 24.9km enkelspoor en wordt, eveneens als lijn L204, momenteel uitsluitend gebruikt voor goederenvervoer. Ook voor lijn 55 zijn via Infrabel data beschikbaar met betrekking tot het aantal passages, tonnages, etc voor 2016. Het aantal passages op weekdays over het traject bedroeg in 2016 2430. Voor weekenddagen was dit gelijk aan 33. Na het extrapoleren en sommeren van de resultaten, komt het aantal afgelegde treinkilometer op dit traject uit op: $2466 \times 24,9 = 61\ 427$. Dit maakt van de lijn een weinig gebruikte goederenlijn.

Ook voor deze lijn kan een inschatting gemaakt worden van de elektrificatiekost. Ze bestaat uit 24.9 km enkelspoor. Dit brengt de kost van de bovenleiding op $24,9\text{km} \times €0,4\text{miljoen}/\text{km} = €9,96\ \text{miljoen}$. Ook hier zal een tractie-onderstation noodzakelijk zijn, en hier kan eveneens aangenomen worden dat één extra sectioneerpost voldoende zal zijn voor elektrificatie van dit traject. Dit brengt de totale kost op €17.96 miljoen.

Beide lijnen situeren zich in het haven gebied rond Gent in België en Terneuzen in Nederland. Investerings in spoorinfrastructuur zijn hier achtergebleven. Daarom hebben de gefuseerde havenbedrijven Zeeland Seaports en Havenbedrijf Gent zich voorgenomen de spoorweginfrastructuur in het havengebied op te waarderen en dit met steun van de lokale overheden. In dat opzicht werden er reeds verschillende haalbaarheidsstudies uitgeschreven. Eén van deze studies onderzoekt of er mogelijkheden zijn om het havengebied van duurzaam personenvervoer via spoor te voorzien zonder het goederenvervoer hierbij te hinderen.

8.2 Overzicht kosten

Tabel 32 geeft een overzicht van de eerder besproken trajecten en de geschatte investeringskosten ervan per treintype. We maken de distinctie tussen passagiers en goederenvervoer en lijsten de commerciële en totale treinkilometers op. Daarnaast geven we ook een indicatie van de investeringskosten in de infrastructuur en in de aankoop van treinstellen. Voor de volledigheid voegen we ook Genk-Bilzen toe. Het is belangrijk te vermelden dat het aantal commerciële kilometers van de lijn Genk-Bilzen hier eerder conservatief is ingeschat, aangezien het aantal treinen er momenteel maar 3 per dag bedraagt. Wanneer er meer treinen rijden, 12 tot 60 treinen per dag lijkt realistisch, zal het aantal kilometers logischerwijs stijgen.

Hierbij beklemtonen we nogmaals een andere basisveronderstelling van dit scenario. **We gaan ervan uit dat alle lijnen in de toekomst op dezelfde manier als de huidige toestand worden geëxploiteerd (dezelfde frequentie, dezelfde amplitude).**

Tabel 20: Geschatte infrastructuurinvesteringen in Miljoen €

	Commercieel aantal kilometers (km)	Totaal aantal treinkilometers (km)	Investering elektrificatie (Infrabel) (Mln. €)	Geschatte Investering bij batterij (Mln. €)	Investering waterstof (Mln. €)
Passagiersvervoer					
Geraardsbergen	460 000	624 657	28.4	5.0	3.0
Eeklo-Ronse	812 000	2 195 295	48.2	15.0	7.0
Aalst-Burst	27 840	37 566	8.5	0.0 ²²	0.0
Charleroi-Couvin	650 000	1 283 233	49.7 ²³	20.0	10.0
Totaal	1 964 732	4 155 643	147.7	40.0	20.0
Goederenvervoer					
Genk-Bilzen	10200	10200	12.9	/	/
Gent-Zelzate	123 325	123 325	16.64	/	/
Wondelgem - Terneuzen	61 427	61 427	17.96	/	/
Totaal	194 952	194 952	47.5	/	/

In Tabel 21 maken we een overzicht van de investering in treinstellen die benodigd zouden zijn per type technologie. We maken hier expliciet de veronderstelling dat er in 2035 nieuwe dieseltreinen zouden worden aangeschaft in het Nul-scenario. Zoals al eerder besproken is dit weinig realistisch, maar nodig om een goed referentiescenario te ontwikkelen ter evaluatie van de verschillende opties.

Tabel 21: Overzicht van investering in treinstellen - per lijn/cluster

	Geschat benodigde stock (inclusief reserve)	Aankoop trein (elektrisch) Mln €	Aankoop trein (batterij) Mln €	Aankoop trein (waterstof) Mln €	Aankoop nieuwe diesel Mln €	Aankoop diesel in nul scenario (verdisconteerd) Mln €
Geraardsbergen-Gent	10	55	60	66	63	43
Ronse – Eeklo	20	110	120	132	127	85
Aalst – Burst	5	28	30	33	32	21
Charleroi – Couvin	15	83	90	99	95	64
Totaal	50	275	300	330	316	214
Verskil met nul scenario		61	86	116	103	

Een ander belangrijk element is de grootte van de reserveloot. Deze is nodig voor een snelle inzet bij mogelijke defecten of herstellingen. **Bij een volledige elektrificatie van de lijn is er in principe geen extra reservestock nodig, gezien men in dat geval een gedeelde vloot kan gebruiken**

²² * Aalst-Burst is een erg weinig gebruikte lijn, waardoor de kosten van mogelijke alternatieven voor elektrificatie mogelijk duurder uitvallen dan volledige elektrificatie als deze apart van andere lijnen zouden gebeuren. We gaan er daarom vanuit dat partiële elektrificatie of het gebruik van waterstofftreinen hier enkel zal plaatsvinden indien andere lijnen in de cluster Gent voor deze optie zullen kiezen. In dat geval zijn er waarschijnlijk geen bijkomende kosten aan de lijn nodig.

²³ Contact met Infrabel bij afronding van het project gaf aan dat de elektrificatiekosten mogelijk hoger kan liggen, voornamelijk voor volledige elektrificatie, door de aanwezigheid van nauwe tunnels voorbij Walcourt. Hier wordt al gedeeltelijk mee rekening gehouden in de sensitiviteitsanalyse.

met de rest van het netwerk. Indien er voor een gespecialiseerde batterij-elektrische of waterstof oplossing wordt gekozen is deze reservestock wel nodig. In praktijk gaat het over een 5 tot 6 tal treinen minder bij de elektrische variant. Bij het uitwerken van de analyse zijn we er echter initieel van uitgegaan dat de benodigde stock in alle gevallen gelijk is, om de vergelijking tussen de verschillende scenario's eenvoudig te houden. **Dit werkt wel enigszins in het voordeel van de alternatieven voor volledige elektrificatie.** Dit wordt behandeld in de sensitiviteitsanalyse 12.3.5. Een andere reden om de reservestock toch mee te nemen - ook bij volledige elektrificatie van het net – is omdat indien de exploitatie van deze lijnen ooit zou uitbesteed worden aan een ander bedrijf dan de NMBS, deze reserve waarschijnlijk wel nodig zou zijn.

9 Quicksan lijn Genk-Bilzen

In dit onderdeel van het rapport maken we een zogenaamde quickscan kosten-baten analyse van de lijn 21C (Genk-Bilzen). In een **quicksan MKBA** maken we een **eenvoudige evaluatie van een investering enkel op basis van kentallen en indicatieve resultaten**. De kentallen baseren we op de tool die ook voor de andere lijnen is gebruikt. We selecteren hier wel specifiek cijfers die toepasbaar zijn voor het goederenvervoer. De volledige tool wordt niet gebruikt.

Vanuit de positie van Infrabel is de beslissing al genomen. Deze analyse is dus vooral ter ondersteuning. We bekijken **hier ook geen alternatief met waterstof en/of batterijtreinen**. De reden is dat deze opties in het goederenvervoer nog minder zijn doorgedrongen dan in het passagierstransport per trein. Het heeft dus weinig zin om dit hier te bekijken. Het gebruik van waterstof in het goederenvervoer werd in hoofdstuk 8 besproken.

In Tabel 22 tonen we de voornaamste kentallen. We gaan uit van een vast aantal werkdagen, een gemiddelde beladingsgraad van de trein en de gemiddelde snelheid op het netwerk. In

Tabel 23 tonen we de karakteristieken van de investering in de lijn. In Tabel 24 maken we een indicatieve inschatting van de reistijdbaten. De indicatieve cijfers werden bekomen via Infrabel, maar de verdere berekening werd uitgevoerd door TML.

Tabel 22: Kentallen goederenvervoer- Bron: Infrabel / MIRA (Delhaye et al, 2017)

Kentallen	Waarde
Aantal werkdagen	250
Belading trein (ton)	500
Bruto/netto verhouding goederen	2.5
Gemiddelde snelheid (km/u)	36
Monetaire kost goederentrein (€/tkm)	0.0409
Tijdskost goederen ton.(€/u)	0.9028
Gegeneraliseerde prijs (€/tkm)	0.066

Tabel 23: Karakteristieken lijn – Bron: Infrabel

Naam lijn	Waarde
Lengte lijn (Genk-Bilzen 21c)	13.6
Aandeel enkel spoor	100%
Snelheid (km/u)	36
Bijkomende lengte alternatieve route via Hasselt (km)	24
Reistijds winst bij gebruik 21C (uren)	0.67
Kosten elektrificatie	
Investeringskost (Mln. €)	12.9
Onderhoud bovenleiding (%)	3%
Onderhoudskost / jaar (Mln. €)	0.387

De transportbaten zijn berekend voor en na het project. In de huidige (2020) omstandigheden blijken slechts drie (diesel)treinen per dag de lijn te gebruiken. Elektrische treinen moeten omrijden via Hasselt. Het gaat hier om een bijkomende lengte van 24 kilometer, wat een extra reisduur betekent van meer dan 40 minuten. Dit aantal wordt geschat op bijna 60 treinen per dag. Het is onwaarschijnlijk dat de relatief kleine lijn 21 C (enkel spoor!) al deze treinen zal kunnen bedienen.

We gaan dus conservatief uit van 12 treinen per dag, of 1 trein elke 2 uur van een etmaal. Daardoor moeten 9 treinen de langere route via Hasselt niet maken. Op een jaar tijd betekent dit tot 27 miljoen tonkilometers minder. Gegeven de kentallen in Tabel 22 betekent dit een transportbaat van 1.782 miljoen euro per jaar. We gaan hier uit van een gelijkaardige kost voor diesel en elektrisch goederenvervoer.

Tabel 24: *Inschatting reistijdboten – Bron: eigen berekeningen*

Trein- en tonkilometers	Voor project	Na project
Aantal treinen L21C /dag	3	12
Aantal treinen via Hasselt /dag	60	51
Aantal trein kilometers L21C /dag (km)	10200	40800
Aantal trein kilometers via Hasselt/dag (km)	564000	479400
Totaal tonkilometers L21C (tkm)	5 100 000	20 400 000
Totaal tonkilometers via Hasselt (tkm)	282 000 000	239 700 000
Totaal beide trajecten (tkm)	287 100 000	260 100 000
Transportboten		
Transportkosten L21C (€)	336 589	1 346 355
Transportkosten Hasselt (€)	18 611 373	15 819 667
Totaal (€)	18 947 962	17 166 022
Transportboten (Mln €)		1.782 €

Als mogelijke bijkomende baat is het mogelijk om de resterende (3 treinen/dag) dieseltreinen op het traject te vervangen door een elektrisch equivalent. Dit betekent een baat van €76 000 of €0.076 miljoen per jaar. Dit is dus een eerder beperkte baat.

Tabel 25: *Emissies dieseltreinen op deeltraject*

Emissies dieseltreinen		
Vervoer met dieseltrein (tkm)	5 100 000	
Emissies	Ton	Waardering
CO	0.59	18 791 €
CO2	147.02	14 337 €
NOx	1.60	33 027 €
PM10	0.04	1 674 €
Sox	0.48	8 137 €
VOS	0.07	257 €
Totale potentiële emissiebaat (Mln €)		0.076 €

We kunnen nu op basis van deze partiële resultaten een inschatting maken van de maatschappelijke baat. We kiezen er hier voor om geen evoluties mee te nemen in de waardering van de emissies, gezien dit weinig bijkomende informatie biedt in de analyse. We kiezen dus voor maximale simpliciteit.

Gegeven deze resultaten komen we op een maatschappelijke (ENPV) voor een elektrificatieproject van lijn 21C van €16.1 miljoen op 30 jaar, met een discontovoet van 4%. De IRR of internal rate of return van het project is 12.5%. De hoge baten ontstaan voornamelijk aan de kant van de gebruiker, in de vorm van lagere transportkosten. De mogelijkheden van de infrastructuurbeheerder (Infrabel) om de kosten van de elektrificatie aan de gebruiker door te rekenen zijn mogelijk beperkt. De kost

van treinpaden aan de gebruiker van het netwerk zijn situatieafhankelijk en vertrouwelijk. We kiezen ervoor om dit hier niet expliciet door te rekenen.

Voor Infrabel ontstaan ook additionele baten doordat dit project de elektrificatiekosten van het project Mol-Hamont positief beïnvloedt. Deze baten nemen we niet expliciet mee, aangezien deze vertrouwelijk zijn en gekoppeld zijn aan een project dat niet onder deze studie valt. Toch concluderen we op basis van deze eerder beperkte gegevens dat de elektrificatie van lijn 21C een aanzienlijke maatschappelijke baat kan genereren, ten opzichte van de investering.

Tabel 26: Maatschappelijke NPV in Miljoen € over 30 jaar, discountvoet gelijk aan 4%

Impact €	Jaar	ENPV (30 jaar)
Reistijdsbaten (Mln. €)	1.782 €	32.60 €
Emissiebaten (optie) (Mln. €)	0.076 €	1.39 €
Onderhoud (Mln. €)	-0.39 €	-7.08 €
Totaal (Mln. €)	1.585 €	26.91 €
Investering in bovenleiding (Mln. €)	12.90 €	
NPV (Mln. €)		14.01 €
IRR		12.50%

10 Quickscan lijn 204 & 55

Voor de spoorlijnen in de Gentse havencluster wordt een gelijkaardige analyse uitgevoerd aan de analyse voor de lijn Genk-Bilzen. Opnieuw zal een quickscan analyse inschatten of investeringen om de lijn te elektrificeren rendabel zijn. De uitgebreide tool komt ook hier dus niet aan bod. Aangezien de focus hier op het goederenvervoer ligt, wordt er geen analyse gemaakt van eventuele waterstof of batterij alternatieven. In een studie uitgevoerd door Goudappel Coffeng (2018) werd het potentieel van personenvervoer op deze lijnen onderzocht. Dit wordt later kort samengevat. Initieel zal er hier vanuit gegaan worden dat enkel het goederenvervoer aanwezig blijft.

10.1 Goederenvervoer

Tabel 27 geeft kentallen voor de twee spoorlijnen. Een deel ervan werd reeds besproken in hoofdstuk 8.1.4 over het goederenvervoer in de havencluster Gent-Terneuzen. Deze waarden werden hier overgenomen. We hanteren gelijkaardige cijfers als in de Quickscan Genk-Bilzen (L21C) in het voorgaande hoofdstuk. We maken hierbij de volgende assumpties:

Elektrische goederentreinen en door diesel aangedreven goederentreinen kunnen in principe verschillende private kosten hebben. Er zijn aanwijzingen (zie Delhaye et al, 2017) dat de private kost van diesellocomotieven in België lager ligt dan deze van elektrische varianten. In de internationale literatuur vindt men echter vaak terug dat goederentreinen met een elektromotor zowel goedkoper zijn in aanschaf, als in onderhoud en aandrijving (EESI, 2018)²⁴. We laten mogelijke verschillen in private kosten in deze quickscan in het midden en kijken enkel naar mogelijke baten in termen van uitstoot van goederenvervoer. We gaan er zo expliciet vanuit dat de private kosten (in €/tkm) gelijkaardig zijn voor diesel en elektrische treinen of tenminste dat we hier geen eenduidige uitspraak over kunnen maken.

De uitstootkarakteristieken van de dieseltrein baseren we op de eerdere cijfers van Genk-Bilzen. We gaan ervan uit dat alle dieseltreinen worden vervangen door een elektrische variant. Tevens gaan we ervan uit dat de elektrificatie niet tot een verandering in de vraag leidt. Beide assumpties zijn niet essentieel, maar maken de analyse veel eenvoudiger. Hiervan afwijken is mogelijk, maar draagt op zich niet wezenlijk bij tot de inhoud van de quickscan. Waar we dus op focussen zijn de mogelijke winsten in termen van milieu en uitstoot als we het verkeer op de lijn emissievrij maken.

De karakteristieken van de beide lijnen herhalen we hieronder. We gaan uit van een investeringskost van €0.8 Miljoen per kilometer voor beide lijnen. Zoals in de case van Genk-Bilzen tellen we 3% onderhoudskosten bij voor de bovenleiding per jaar.

Tabel 27 kentallen per spoorlijn, Bron: TML berekeningen op basis van Infrabel

	Lijn 204	Lijn 55
Lengte lijn (km)	17.1	24.9
Aandeel enkel spoor(%)	±100%	100%
Snelheid (km/u)	36	36
Investeringskost elektrificatie (Mln. €)	14.84	17.96
Onderhoudskost in Mln. € (3% per jaar)	0.445	0.539

²⁴ <https://www.eesi.org/articles/view/electrification-of-u.s.-railways-pie-in-the-sky-or-realistic-goal>

In onderstaande tabel (Tabel 28) geven we de emissiefactoren van goederentreinen op diesel weer. Deze zijn op basis van Delhaye et al (2017) en EMMOSS. We komen zo op een emissiekost van ongeveer 1.5 eurocent per tonkilometer.

Tabel 28: Emissies goederentrein diesel en waarderingen in €/ton

	Emissiefactor diesel (g/tkm)	Waardering (€/ton)
CO	0.11	32066
CO2	28.83	98
NOx	0.31	20600
PM10	0.01	47000
Sox	0.09	17100
VOS	0.01	3600
Emissiekost €/tkm	0.015	

Tabel 29 geeft een overzicht van het aantal tonkilometers per lijn, alsook van de daaraan verbonden kosten. De lijn specifieke gegevens zijn gebaseerd op data van infrabel uit 2016.

Tabel 29: Onderbouwing tonkilometers, bron: Infrabel

Impact	lijn 204	lijn 55
Lengte van het traject (km)	17.1	24.9
Treinpassages/jaar	7212	2463
Treinkilometers/jaar (km)	123 325	61 328
Gemiddeld tonnage/trein (ton)	583	503
Tonkilometers/jaar (tkm)	71 896 608	30 664 350
Potentiele emissiebaat / jaar (€)	1 074 556 €	458 305 €

Tabel 30 stelt de resultaten voor van de netto huidige waarde berekening over 30 jaar. Uit deze quickscan bekomen we dat de impact van de elektrificatie van lijn 204 en lijn 55 negatief zijn voor deze periode en met bovenstaande aannames. Voor lijn 204 komen we op een totaal van –€3 324 139 Miljoen €, voor lijn 55 is dit zelfs zeer negatief met een negatieve baat van –€19 417 786. Voor lijn 55 is de nodige investering in bovenleidingen vele malen te hoog in verhouding met de mogelijke opbrengst. Dit komt voornamelijk omdat lijn 55 niet intensief genoeg wordt gebruikt om de investering maatschappelijk te recupereren.

In het geval van lijn 204 is de investering marginaal negatief te noemen en is het negatieve resultaat voornamelijk toe te schrijven aan onze aannames van mogelijke emissiebat en onderhoudskosten van de bovenleiding. We voegen daarom een kleine sensitiviteitsanalyse toe.

Tabel 30: NPV (in miljoen €) voor goederenlijn L204 en L55

	Lijn 204		Lijn 55	
	Impact/jaar	ENPV (30 jaar)	Impact/jaar	ENPV (30 jaar)
Emissiebaten elektrificatie (Mil. €)	1 074 556 €	19 655 816 €	458 305 €	8 383 327 €
Investering bovenleiding (Mil. €)		14 840 000 €		17 960 000 €
Onderhoudskosten spoor (Mil. €)	445 000 €	8 139 955 €	538 000 €	9 841 114 €
NPV (Mil. €)		-3 324 139 €		-19 417 786 €
IRR		1.9%		/

In Tabel 31 geven we een kort overzicht van de gevoeligheid van het eindresultaat van lijn 204 en lijn 55. Zoals men kan verwachten is het resultaat voor beide lijnen positiever indien we uitgaan van hogere emissiebaten (2 eurocent/tkm in de plaats van 1.5 eurocent/tkm), lagere onderhoudskosten (2% in de plaats van 3% van het totaal) of een langere tijdshorizon (40 jaar). Veruit de gevoeligste parameter is de emissiebatan per tonkilometer voor het afstappen van goederenvervoer op diesel. Verhogen we deze naar 0.02 €/km dan is de NPV wel positief voor lijn 204 en stijgt deze naar meer dan 3.3 miljoen €. Een extensie van de tijdshorizon of lagere onderhoudskosten op zich zijn niet genoeg om het project 'positief' te maken. Bij een combinatie van deze optimistischere inschattingen stijgt de NPV zelfs naar bijna €9 miljoen, met een IRR van 7.9%. Voor lijn 55 blijft het resultaat negatief, zelfs indien we zeer optimistische parameters hanteren.

Tabel 31: Sensitiviteitsanalyse L204 en L55

Impact	Lijn 204		Lijn 55	
	ENPV (€)	IRR	ENPV (€)	IRR
Basiswaarde	-3 324 139 €	1.9%	-19 417 786 €	/
Onderhoudskost 2% investering	-613 260 €	3.60%	-16 147 171 €	-9%
Emissiebatan 0.02 € / tkm	3 319 090 €	5.90%	-16 597 481 €	-10.20%
Tijdshorizon naar 40 jaar	-1 672 994 €	3.20%	-19 599 193 €	/
Combinatie van bovenstaande	8 887 303 €	7.90%	-12 676 826 €	-2.45%

10.2 Personenvervoer

In 2018 onderzocht Goudappel Coffeng de mogelijkheden om de laag benutte spoorlijnen 204 en 55 op te waarderen en bruikbaar te maken voor personenvervoer, zoals eerder al werd besproken in hoofdstuk 2.2. Ze onderzochten hierbij verschillende mogelijkheden, in het totaal 7 varianten waarvan er 5 op de oostelijke oever van het kanaal zouden rijden en 2 op de westelijke oever. De varianten verschilden onderling ook op begin- en eindpunt, frequentie per richting, maximum snelheid en dergelijke meer. Verder werden er doorrekeningen gedaan voor de verschillende types kosten verbonden aan het type aandrijving. Voor iedere variant werd de mogelijkheid onderzocht om de trein aan te drijven met elektrische, diesel, waterstof of hybride aandrijving.

De resultaten voor de verschillende varianten werden vertaald naar kostendeckingsgraden, omdat hiermee kan worden ingeschat in welke mate de reizigersopbrengsten de kosten dekken. Daarbovenop komt de initiële investeringskost die noodzakelijk is om het traject berijdbaar te maken

voor personentreinvervoer. Het blijkt dat de kostendeckingsgraad voor lijnen onder NMBS exploitatie lager ligt dan wanneer de lijn wordt aangeboden onder een alternatief regime. In een optimale situatie (variant 5a) bedraagt de kostendeckingsgraad onder alternatieve exploitatie 39% met elektrische aandrijving, dewelke hoger is dan met de andere types aandrijvingen. Ook de investeringskost is hier relatief laag in vergelijking met andere varianten en bedraagt €188 miljoen. Hierbij is de elektrificatie kost inbegrepen. Ten opzichte van het nul scenario, de situatie zonder personenvervoer, lopen de kosten logischerwijs hoog op.

De baten van deze lijn inschatten is complexer aangezien het hier een nieuwe lijn betreft. Er is bijgevolg geen één op één vergelijking mogelijk. De baten zullen ontstaan door de herverdeling in het aandeel van de verschillende modaliteiten die deze nieuwe personenvervoer spoorlijn zal realiseren. De grootste kansen die de studie aanhaalt zijn ten eerste, de verminderde congestie op het wegennet²⁵. Ten tweede de verminderde emissies door het gebruik van een elektrisch aangedreven trein. Ten derde een betere bereikbaarheid van bedrijven die in de haven gelokaliseerd zijn. Bijgevolg hebben deze bedrijven ook toegang tot meer correct geschoold personeel voor de respectievelijke functies. Dit kan de productiviteit verhogen. De laatste grote kans die er volgens de studie ligt is de betere ontsluiting van de studentenstad Gent en de connectie ervan met Nederland, waardoor ook de Universiteit kan groeien.

Om het pad van personenvervoer op deze lijn verder te onderzoeken en een eventuele investeringsbeslissing te nemen, zullen de baten beter becijferd moeten worden en dit op basis van verschillende scenario's. Alleen op deze manier kan een correcte maatschappelijke kosten batenanalyse gemaakt worden die de investeringsbeslissing kan onderbouwen.

²⁵ Hier moet echter rekening gehouden worden met het rebound-effect. De vrijgekomen ruimte op de weg door de overstap van wegverkeer naar het spoor, trekt nieuwe weggebruikers aan die deze plaats gedeeltelijk terug zullen opvullen.

11 Evaluatie te elektrificeren lijnen (zonder goederenlijnen L21C, L204 en L55)

11.1 Projectalternatieven

We bekijken de volgende scenario's.

Voorgestelde scenario varianten

- Nul scenario: Gebruik van MW41 dieseltractie tot 2035 waarna nieuwe dieseltreinen worden aangekocht
- Elek 2035 scenario: Gebruik van dieseltractie tot 2035 waarna de lijn geëlektrificeerd wordt. We veronderstellen dat er nieuwe elektrische treinstellen worden aangeschaft.
- Diesel 2025 scenario: Versnelde aankoop van nieuwe dieseltreinen in 2025
- Elek 2025: Elektrificatie met nieuwe treinstellen vanaf 2025
- Bat 2025: Aankoop van nieuwe batterijtreinen: Inzet van nieuwe trein vanaf 2025.
- Wat_5 2025: Aankoop van nieuwe waterstofrein: Inzet nieuwe trein vanaf 2025. Waterstofprijs €5/kg
- Wat_2 2025: Aankoop van nieuwe waterstofrein: Inzet nieuwe trein vanaf 2025. Waterstofprijs €2/kg

Het Nul scenario voorziet in de aanschaf van nieuwe dieseltreinen in 2035, dit scenario figureert enkel als vergelijkend scenario. De bestaande MW41 kan naar alle waarschijnlijkheid nog tot 2035 worden ingezet. Het Elek 2035 scenario gaat uit van de volledige elektrificatie van de lijn en inzet van nieuwe elektrische treinstellen. Het Diesel scenario is een variant op het Nul scenario, waarbij de oudere MW41 dieseltractie eerder wordt vervangen door een nieuwer diesel model dat beantwoordt aan de actuele EU emissienormen. We voegden dit scenario toe om de vergelijkbaarheid van nieuwe technologie in tractie (batterij, waterstof) beter te kunnen vergelijken met de state-of-the-art in nieuwe dieseltractie. Dit maakt het gemakkelijker om de vergelijking in toegevoegde waarde van (vooral) de waterstofrein in vergelijking met de dieseltrein te maken. In de Elek 2025 optie gaat het eerder over een 'versnelde' elektrificatie van de lijn..

In principe hadden we bij de elektrificatie scenario's (Elek 2035 en Elek 2025) ook een optie kunnen toevoegen met gebruik van treinen uit de bestaande (generische) stock. We kozen ervoor om dit niet te doen, gezien dit mogelijk tot een vertekening van de resultaten kan leiden. Gezien het hier mogelijk over oudere treinstellen gaat zouden aannames in verband met onderhoudskosten en energieverbruik mogelijk niet op gaan. Daarnaast moet zelfs bij generisch materieel een gebruikskost of opportunitetskost worden gerekend, die althans gedeeltelijk zou samenvallen met de aanschafkosten van nieuwe treinstellen. In de sensitiviteitsanalyse houden we echter wel rekening met de impact van lagere aanschafkosten en/of een kleinere nieuwe stock op het resultaat. Deze aannames zouden grotendeels samenvallen met het gebruik van generisch materiaal. We komen hierop terug in paragraaf 12.3.3 en 12.3.5.

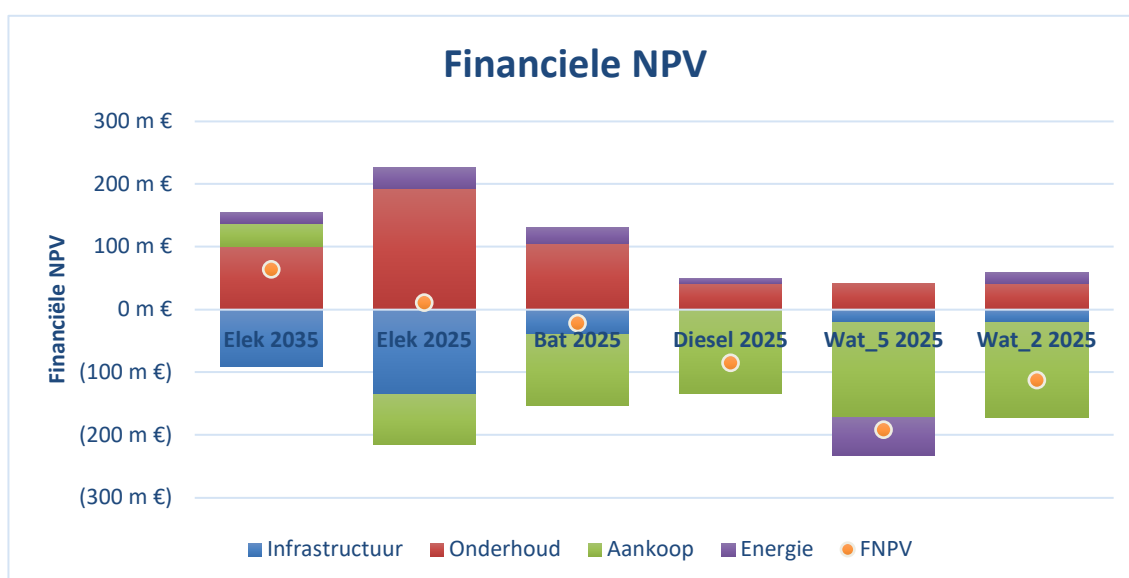
11.2 Resultaten

11.2.1 Financiële NPV voor spoor

We bekijken eerst afzonderlijk de financiële impact voor het gehele spoor (operator en netbeheerder). Alle resultaten worden gegeven in vergelijking met het Nul scenario, wat een doorloop in het gebruik van dieseltreinen impliceert.

Tabel 32: Overzicht kosten

	Elektrische 2035	Elektrisch 2025	Diesel	Batterij	Waterstof (€5 /kg)	Waterstof (€2 /kg)
Investering (Mln €)	-91 €	-135 €	-40 €	0 €	-20 €	-20 €
Onderhoud (Mln €/jaar)	101 €	193 €	105 €	42 €	42 €	42 €
Aankoop (Mln €/jaar)	36.46	-80.27	-112.98	-134.23	-152.23	-152.23
Energie (Mln €)	17 €	33 €	26 €	7 €	-61 €	18 €
Totaal (Mln €)	64 €	11 €	-22 €	-85 €	-192 €	-112 €



Figuur 29: Financiële NPV investeringsscenario's spoor

In Figuur 24 en gelijkaardige volgende figuren geeft 'een bol' aan hoe een scenario scoort ten opzichte van het Nul scenario. Ligt de bol boven de x-as en is deze dus positief, dan betekent dit effectief een besparing ten opzichte van het doorlopend gebruik van dieseltechnologie (de MW41 tot in 2035 en daarna nieuwe dieseltreinen). Hetzelfde geldt voor de subcategorieën: infrastructuur, onderhoud, aankoop, energie. Wanneer deze blokken zich boven de x-as bevinden en dus positief zijn, betekent dit dat het desbetreffende scenario op dat gebied beter scoort dan het nul scenario. Andersom, ligt het blok onder de x-as, dan scoort het desbetreffende scenario slechter dan het nul scenario in de gegeven categorie.

Het Elek 2035 scenario scoort het hoogst ten opzichte van het Nul scenario. **Dit betekent dat puur vanuit een financiële optiek het beter lijkt om de dieseltreinen nog tot 2035 in te zetten en daarna pas de lijn te elektrificeren.** Het Elek 2025 scenario scoort iets lager, maar nog steeds positief ten opzichte van het Nul scenario, het Bat 2025 scoort dan weer net negatief. Twee elementen leiden tot dit resultaat. Ten eerste impliceert het gebruik van elektrische treinen een serieuze besparing in onderhoudskosten ten opzichte van dieseltreinen. Ten tweede is hun energiekost gemakkelijk 50% lager. Bij het gebruik van batterijtreinen is de besparing in onderhoudskosten kleiner, door de

mogelijke kosten bij vervangen van de batterij. Dit wordt gedeeltelijk gecompenseerd door de lagere infrastructuurkosten bij batterijtreinen. Het eerder vervangen van de MW41 door nieuwere dieseltechnologie lijkt geen interessante optie. Het gebruik van waterstoffreinen is echter een nog duurder optie. De reden is dat deze in gebruik vergelijkbare of hogere kosten hebben als nieuwe dieseltreinen en daarenboven ook nog een aantal aanpassingen in infrastructuur (zoals een tankinstallatie) vragen. Dalen de kosten voor waterstof in de toekomst tot €2/kg of lager dan is er op het gebied van energiekosten een baat. Zijn de kosten in infrastructuur beperkter dan hier aangenomen, dan zijn de financiële kosten van een waterstoffrein mogelijk vergelijkbaar met deze van dieseltreinen.

11.2.2 Volledige NPV (inclusief effect op leefmilieu)

De volledige maatschappelijke NPV of ENPV (Environmental Net Present Value) houdt ook rekening met de impact op leefmilieu. Gezien de relatief hoge lokale emissies van dieseltreinen is dit relevant. Overgaan naar een elektrische, batterij of waterstof variant van de trein leidt tot baten doordat elektrische of waterstoffreinen veel minder fijn stof en nagenoeg geen NOx of andere lokale emissies veroorzaken. Dit heeft een bijkomende relevantie indien (delen van) de lijn in de toekomst onder het LEZ regime van de stad Gent zouden vallen. Hoewel een elektrische trein en/of waterstof wel degelijk emissies van fijn stof veroorzaken, mogelijk via indirecte weg (elektriciteitsproductie) is dit verwaarloosbaar ten opzichte van dieselemisies van de MW41 trein of nieuwe dieseltreinen (zie ook paragraaf 5.6) Daarom zetten we in *Tabel 33* deze op nul. Zoals eerder uitgelegd zijn de CO2 emissies van waterstof hoger dan deze van puur elektrische treinen, door de lagere energie-efficiëntie van waterstof. Het verschil in impact op leefmilieu is echter beperkt, gezien de baten van de lagere lokale emissies aanzienlijk groter zijn.

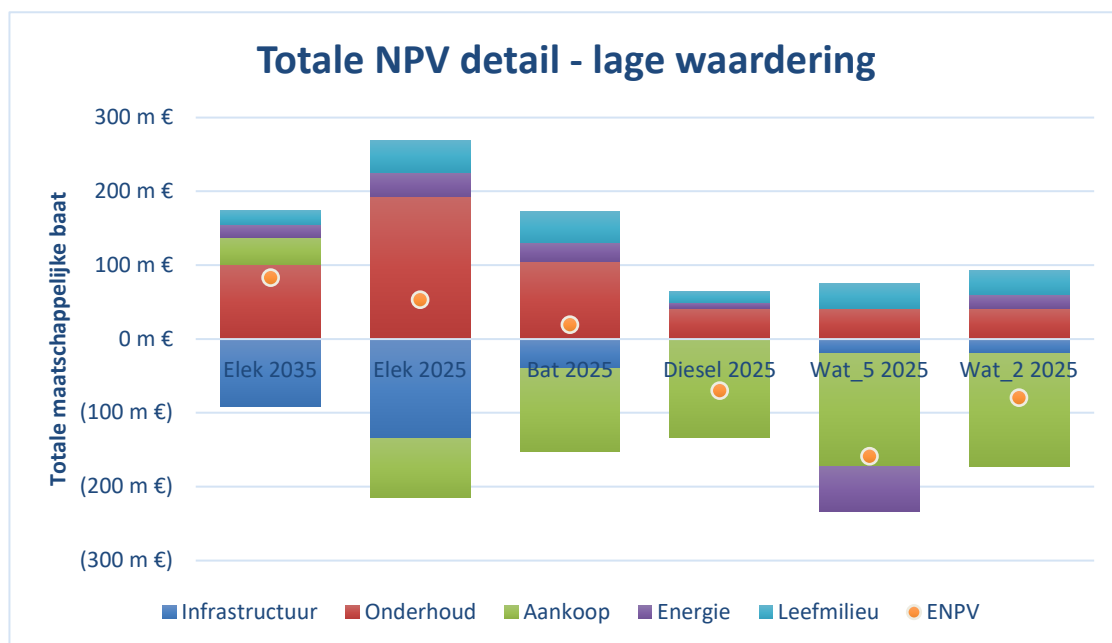
Tabel 33: Jaarlijkse emissies en waardering emissiekosten

	CO	CO2	Nox	PM10	Sox	Vos
Geraardsbergen (ton)	6	3 232	32	0	13	2
Ronse (ton)	20	11 359	112	2	46	6
Aalst (ton)	0	194	2	0	1	0
Charleroi (ton)	12	6 640	65	1	27	4
Totaal (ton)	37	21 426	211	3	87	12
Lage waardering (€)	46 951 €	920 810 €	912 324 €	152 442 €	753 396 €	21 490 €
Hoge waardering (€)	1 300 630 €	2 306 916 €	4 699 296 €	456 428 €	1 610 668 €	47 484 €

Lage emissiewaarderingen

We bekijken eerst de resultaten met een lagere emissiewaardering. We voegen de waardering voor leefmilieu effecten toe aan *Figuur 29* om tot de totale NPV of ENPV te komen. We bekijken hierbij eerst alle lijnen samen. **Hoewel we in de elektrificatie na 2025 de grootste onderhoud- en leefmilieubaten zien, wordt dit min of meer geneutraliseerd door de hogere aankoopkost (snellere afschrijving MW41) en investeringskosten. Daarom blijft over de hele lijn een volledige elektrificatie van de overblijvende diesellijnen na 2035 de beste optie.** Van de 'alternatieven' voor volledige elektrificatie valt vooral het gebruik van de batterijtrein op. Deze scoort nog steeds goed en vormt duidelijk een haalbare optie voor elektrificatie. Het versneld afschrijven van de MW41 om nieuwe dieseltreinen aan te schaffen of de waterstoffrein te gebruiken scoort over het algemeen negatief. **De totale baten van nieuwe dieseltreinen en een waterstoffrein met lage**

kosten voor waterstof (~€2/kg) zijn zeer gelijkaardig. De milieubaat van waterstoffreinen is hoger dan deze van dieseltreinen, maar de waterstoffrein is duurder in aankoop.

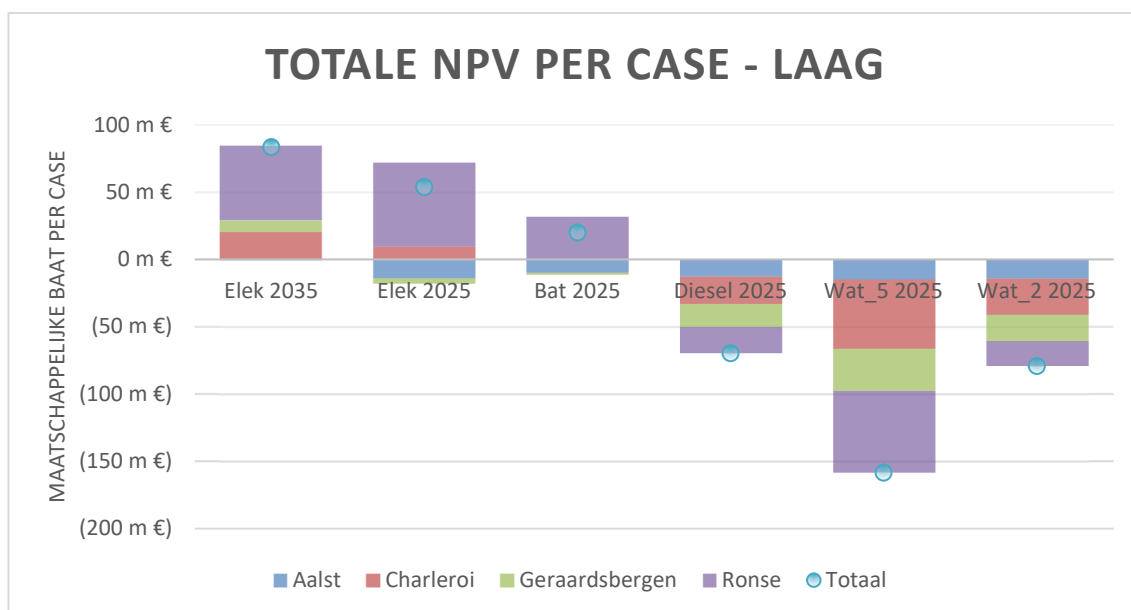


Figuur 30: Totale maatschappelijke baat (Planbureau waarderingen)

In Tabel 34 zien we de waarderingen van elke case. Dit toont onmiddellijk de variatie in de verschillende deelprojecten. In het geval van Aalst heeft elke mogelijke investering een negatieve impact, dit komt omdat de lijn momenteel niet genoeg gebruikt wordt om grote investeringen te rechtvaardigen. **Elektrificatie na 2035 is het meest voordelige scenario over het algemeen, behalve voor de lijn Eeklo-Ronse waar een versnelde elektrificatie na 2025 het meest voordelige scenario is.**

Tabel 34: Volledige NPV in miljoen euro voor alle lijnen lage emissiewaardering (FPB)

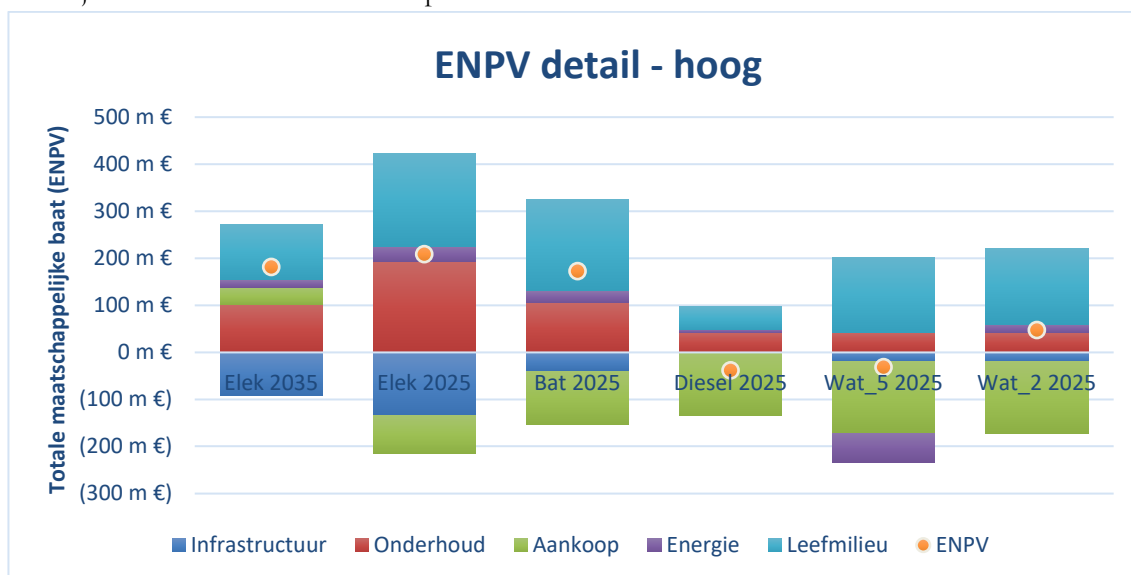
Lage waardering (Mln. €)	Elek 2035	Elek 2025	Bat 2025	Diesel 2025	Wat_5 2025	Wat_2 2025
Aalst-Burst	-1	-14	-10	-13	-15	-14
Charleroi-Couvin	20	10	0	-20	-51	-27
Geraardsbergen	9	-4	-2	-17	-31	-19
Eeklo-Ronse	55	62	32	-19	-61	-19
Totaal	84	54	20	-70	-158	-79



Figuur 31: Maatschappelijke baat per case (Planbureau waarderingen)

Hoge emissiewaarderingen

We bekijken nu de resultaten met een hoge emissiewaardering. We bekijken opnieuw eerst alle lijnen samen. **Doordat we nu emissies en dus leefmilieu hoger waarderen, wordt het opportuun om sneller te gaan elektrificeren (na 2025).** Het gebruik van de batterijtrein scoort nagenoeg hetzelfde als de elektrificatie na 2035. **Waterstoffreinen scoren nu wel significant hoger dan dieseltreinen, zeker als de prijs voor waterstof laag blijft (€2/kg).** Toch blijven de puur elektrische of batterijvarianten een interessantere optie.

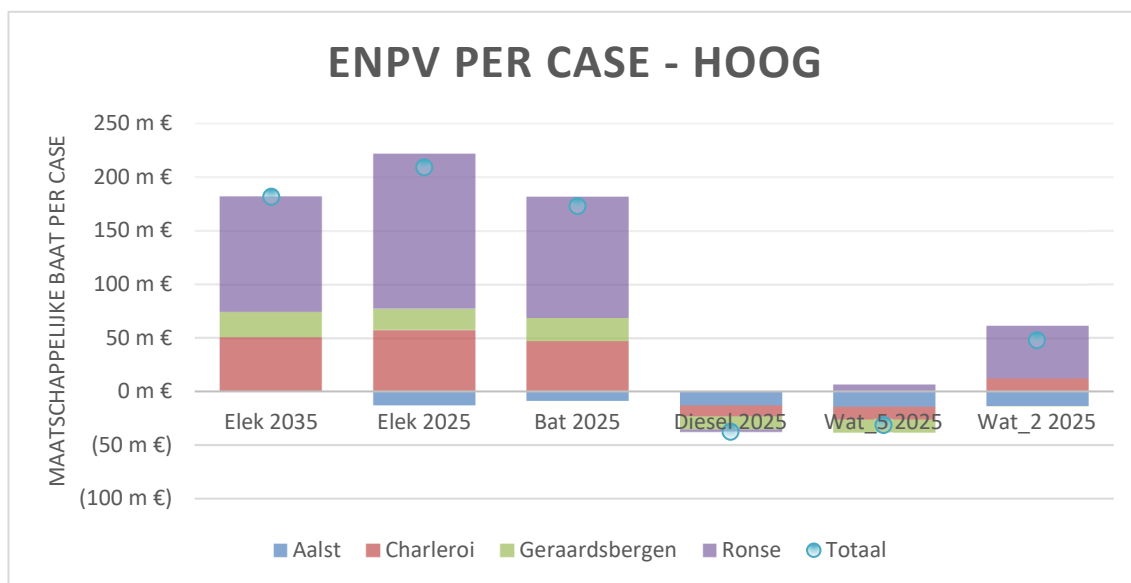


Figuur 32: Totale maatschappelijke baat (CE Delft waarderingen)

In Tabel 35 tonen we de resultaten per lijn. Hier valt op dat er toch enige variatie is binnen elke lijn. Elektrificatie na 2035 is voor Aalst de enige ‘niet-negatieve’ optie. Voor Charleroi-Couvin en lijn 122 naar Geraardsbergen geldt dat de batterijvariant en elektrificatie zeer gelijkaardige baten hebben, waarbij de batterijvariant in het geval van Geraardsbergen opvallend goed scoort. Dit komt omdat de investeringskosten in dit geval erg beperkt zijn. **Voor de lijn Eeklo-Ronse geldt dat volledige elektrificatie na 2025 met voorsprong de meest voordelige optie is.**

Tabel 35: Volledige NPV in miljoen euro voor alle lijnen hoge emissie waardering (CE Delft)

Hoge waardering (Mln. €)	Elek 2035	Elek 2025	Bat 2025	Diesel 2025	Wat_5 2025	Wat_2 2025
Aalst-Burst	0 €	-13 €	-8 €	-13 €	-14 €	-13 €
Charleroi-Couvin	51 €	58 €	47 €	-10 €	-12 €	13 €
Geraardsbergen	24 €	20 €	22 €	-12 €	-12 €	0 €
Eeklo-Ronse	107 €	145 €	113 €	-2 €	7 €	49 €
Totaal	182 €	209 €	173 €	-37 €	-31 €	48 €



Figuur 33: Maatschappelijke baat per case (CE Delft waarderingen)

12 Sensitiviteitsanalyse

12.1 Opzet van de sensitiviteitsanalyse

De rekentool heeft een ingebouwde methode voor sensitiviteitsanalyse. Deze werd in het project uitgewerkt op basis van de DG Regio (2014) Guide to Cost Benefit Analysis. We passen deze sensitiviteitsanalyse toe in drie stappen. Als eerste en kritieke stap kennen we boven- en ondergrenzen aan de kentallen toe (Tabel 36). Deze zijn gebaseerd op het literatuuronderzoek (zie hoofdstuk 2) en intensieve consultatie met de NMBS en Infrabel.

Tabel 36: Sensitiviteitsanalyse - boven en ondergrenzen van de voornaamste kentallen

Prijs energiebronnen	Eenheid	Onder	Basis	Boven
Waterstof	€/kg	2	5	7
Elektriciteit	€/kWh	0.07	0.089	0.12
Diesel	€/l	0.4	0.5	0.6
Verbruik	Eenheid	Onder	Basis	Boven
Waterstof	kg/km	0.23	0.25	0.28
Elektriciteit	kWh/tkm	0.038	0.04	0.045
Batterij	kWh/tkm	0.0418	0.044	0.0495
Diesel	l/km	1.55	1.62	1.8
Nieuwe diesel	l/km	1.1	1.2	1.4
Totale energiekost / km	Eenheid	Onder	Basis	Boven
Waterstof	€/km	0.46	1.25	1.96
Elektrisch		0.27	0.36	0.54
Batterij		0.29	0.42	0.59
Diesel		0.62	0.81	1.08
Nieuwe Diesel		0.44	0.6	0.84
Onderhoudskost/km	Eenheid	Onder	Basis	Boven
Waterstof	€/km	0.91	2.4	2.8
Elektrisch		0.69	0.97	1.8
Batterij		0.85	1.8	3.6
Diesel		2.4	3.6	4
Nieuwe Diesel		0.91	2.4	2.8
Investeringskost		Onder	Basis	Boven
Multiplier investering	%Totaal	80%	100%	150%
Kost elektrificatie	€/km	0.4	0.8	1.6
Aandeel investering - batterijtrein	%Totaal	10%	30%	50%
Aandeel investering - waterstof	%Totaal	10%	30%	50%
Aankoop treinen		Onder	Basis	Boven
Elektrische trein	Mln €	4.5	5.5	6.5
Dieseltrein (nieuw)		5	6.325	7
Waterstoffrein		5.5	6.6	7.5
Batterijtrein		5	6	7

De tweede stap is om op basis van bovenstaande tabel te bekijken wat het meest optimistische (Best case) en meest pessimistische (Worst case) scenario is (Tabel 37). Dit geeft aan binnen welke grenzen zich de sensitiviteitsanalyse plaatsvindt. Als derde stap zullen we parameter per parameter onderzoeken wat de impact is van wijzigingen in die parameter, waarbij we proberen dit in een

grafisch interpreteerbare manier voor te stellen. De laatste stap in de analyse is een Monte Carlo simulatie, waarin een groot aantal variaties uit de brede set van parameters wordt aangemaakt. Dit geeft dan een inschatting van de mogelijke variatie op het eindresultaat door de onzekerheden in het scenario.

12.2 Minimum en maximum van elk scenario

We bekijken hieronder (Tabel 37) de theoretische limiet van elk scenario in totale maatschappelijke baat (ENPV in Miljoen €). We tonen ook de variant met lage en hoge emissiewaarderingen. Over het algemeen verandert dit relatief weinig aan hoe de scenario's ten opzichte van elkaar scoren. Zo scoren de volledig en partieel elektrische opties hier ongeveer even goed. **De batterijtrein heeft mogelijk de grootste baten, maar kent ook een grotere negatieve afwijking.** De kleinste positieve en negatieve baat zien we voor dieseltreinen, omdat hier de technologische en operationele karakteristieken het best gekend zijn. 'Gewone' elektrificatie na 2035 is het veiligste scenario.

Het waterstof 2025 scenario toont de grootste variatie. De reden is een opeenstapeling van onzekerheden, zowel in de prijs van energie – de aankoopprijs van waterstoffreinen en de kosten van de infrastructuur. **Het meest optimistische scenario van de waterstoffrein scoort daardoor wel significant beter dan elektrificatie.** Dit werkt echter ook in de negatieve zin. Dat maakt de **waterstoffrein de meest risicovolle investering.** Bij de andere scenario's is de variatie minder heftig.

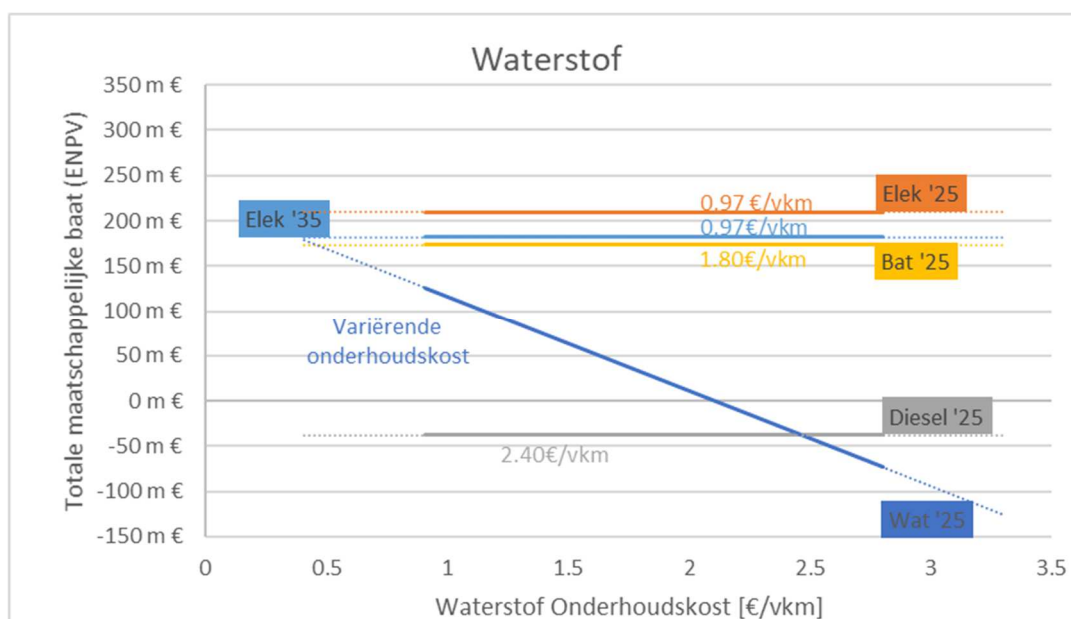
Tabel 37: Best case en worst case scenario met verschillende emissiewaarderingen (ENPV in Mln € tov het Nul scenario)

Scenario	Waardering emissies (Mln. €)	Best case	Basis	Worst case
Elek 2035	Laag	187 €	84	-63 €
Diesel 2025		75 €	-70	-136 €
Elek 2025		185 €	54	-186 €
Batterij 2025		210 €	20	-191 €
Waterstof 2025		155 €	-158	-385 €
Elek 2035	Hoog	270 €	182 €	20 €
Diesel 2025		107 €	-37 €	-104 €
Elek 2025		341 €	209 €	-31 €
Batterij 2025		378 €	173 €	-22 €
Waterstof 2025		295 €	-31 €	-245 €

12.3 Parameter analyse

De resultaten in vorige paragraaf geven ons een goed inzicht in de variatie van de resultaten en de verwachte uitkomsten. Toch missen we nog informatie die ons toelaat om te beoordelen welke parameters het meeste invloed hebben op de analyse. We gebruiken hiervoor een voorstelling waarbij we op de horizontale as (x-as) de parameter variëren binnen de grenzen die we gesteld hebben in Tabel 36. Op de y-as plaatsen we voor elke technologie de totale maatschappelijke baat of ENPV in miljoen euro. We variëren voor elke technologie afzonderlijk de parameter binnen de grenzen in Tabel 36, de volle lijnen geven deze variatie aan. De stippellijn op de grafiek geeft de lineaire extrapolatie van het resultaat weer. Dit staat ons toe om visueel te achterhalen hoe reactief een bepaalde parameter is en wanneer deze zou leiden tot een hogere baat dan een ander scenario. Voor de parameters van de technologieën die niet variëren wordt de basis waarde genomen, als de constante waarde. **We gebruiken de variant met hoge emissiewaarderingen hier steeds als de basis!**

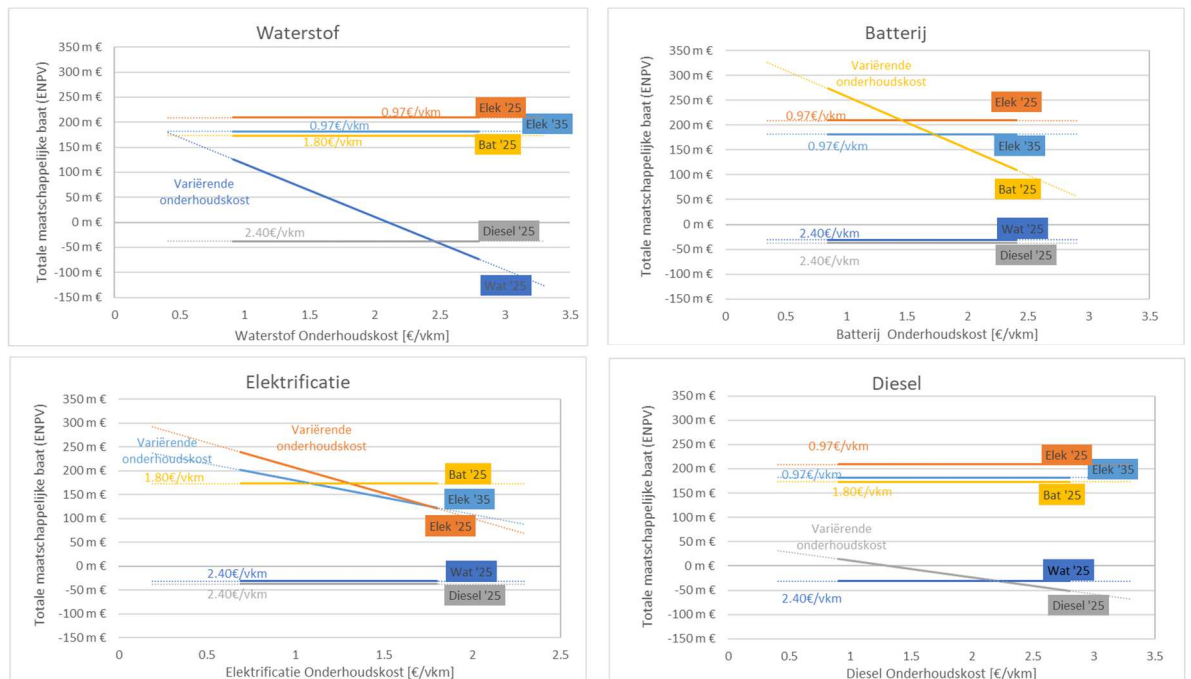
We geven in Figuur 34 een voorbeeld. We variëren de onderhoudskost van de waterstoffrein (in €/vkm). Bij een basiswaarde van €2.4/vkm scoort het scenario ongeveer gelijk met de aanschaf van nieuwe dieseltreinen (enkel de maatschappelijke baat van waterstoffreinen varieert hier, de waarde van de andere scenario's wordt weergegeven door rechte lijnen). Bij een lagere onderhoudskost verkleint de afstand tot de scenario's met elektrificatie, maar leidt niet tot een hogere totale maatschappelijke baat (gemeten in ENPV). Om gelijkwaardig met de batterijrein te scoren, zou de onderhoudskost tot een (onrealistisch lage) 0.5 €/vkm moeten zakken.



Figuur 34: Voorbeeld sensitiviteitsanalyse onderhoudskost waterstof

12.3.1 Onderhoudskosten

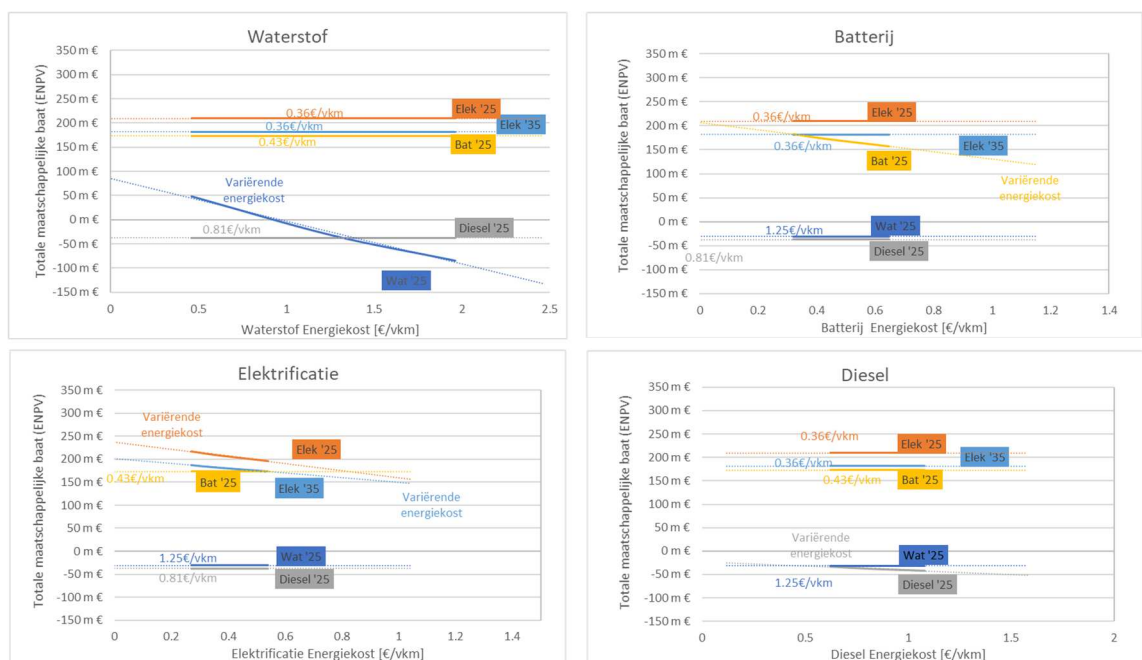
De onderhoudskosten van de trein zijn een zeer belangrijke parameter in de hele analyse. Voor waterstof en batterijtreinen zijn zij zelfs de meest gevoelige parameter. Het geval van waterstof bespreken we al hierboven (ter illustratie). We zien dat als de onderhoudskost van de batterijrein een lagere waarde aanneemt (rond €0.9/vkm) deze beter scoort dan de alternatieven met volledige elektrificatie. Lage onderhoudskosten voor elektrische treinen zorgen ervoor dat het interessanter wordt om sneller te gaan elektrificeren, aangezien het voordeel ten opzichte van dieseltreinen groter wordt.



Figuur 35: Sensitiviteitsanalyse onderhoudskosten per technologie. Horizontale (x-as): onderhoudskosten in €/voertuigkm. Verticale as (y-as): totale maatschappelijke NPV of ENPV in miljoen euro.

12.3.2 Energiekosten

Naast onderhoudskosten spelen energiekosten een belangrijke rol. Vooral bij waterstof is de analyse gevoelig voor deze parameter. Toch moet erop gewezen worden dat de energiekost op zichzelf een minder belangrijke parameter is dan onderhoud. De energiekosten van elektrische alternatieven (inclusief batterijtreinen) variëren slechts in een heel beperkt domein. Daarom speelt de energiekost geen grote rol in de analyse van elektrische treinen. Nieuwe dieseltreinen verbruiken gemiddeld minder dan de MW41, waardoor energiekosten een kleinere rol spelen dan misschien vooraf aangenomen.

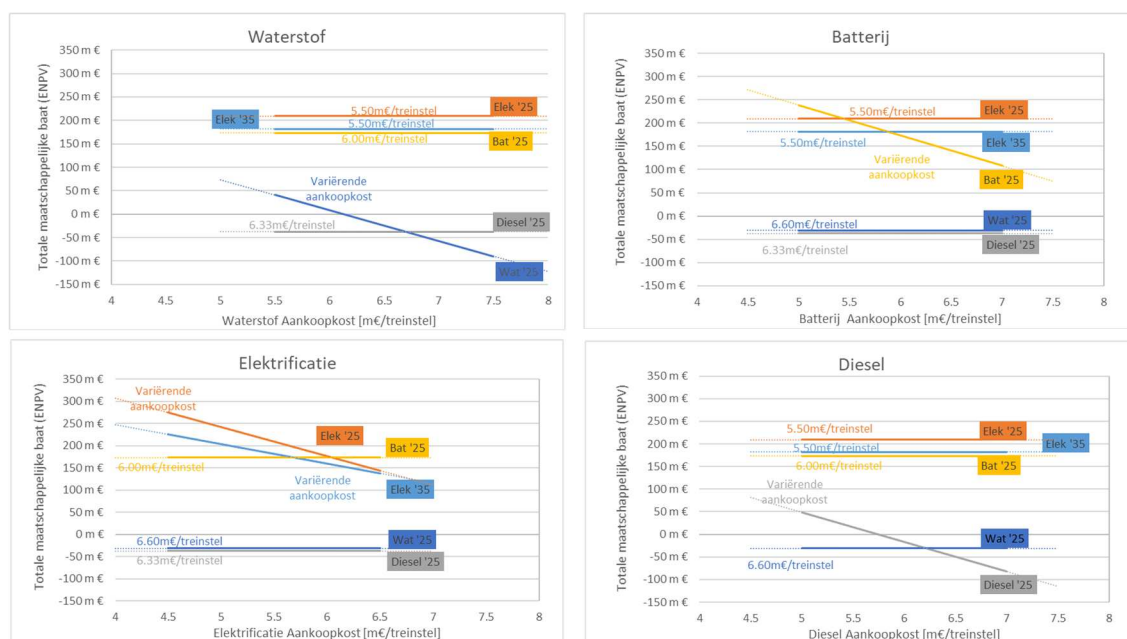


Figuur 36: Sensitiviteitsanalyse energiekosten per technologie. Horizontale (x-as): energiekosten in €/voertuigkm. Verticale as (y-as): totale maatschappelijke NPV of ENPV in miljoen euro.

12.3.3 Aanschafkosten nieuwe treinstellen

Zoals kan verwacht worden is de aanschaf van nieuwe treinstellen een belangrijk element in de analyse. Gezien er een vloot van ongeveer 50 treinstellen moet worden aangekocht kunnen zelfs kleinere variaties in de prijs een weerslag hebben op de maatschappelijke baat. De meerprijs van een batterijtrein is hier een belangrijke beslissingsparameter. Kost deze per treinstel aanzienlijk meer dan de elektrische variant (meer dan 30%) dan wordt elektrificatie overduidelijk het meest haalbare alternatief. Ook bij waterstoffreinen is dit een belangrijke parameter, hoewel een goedkopere waterstoffrein op zich niet genoeg is om het scenario economisch interessant te maken.

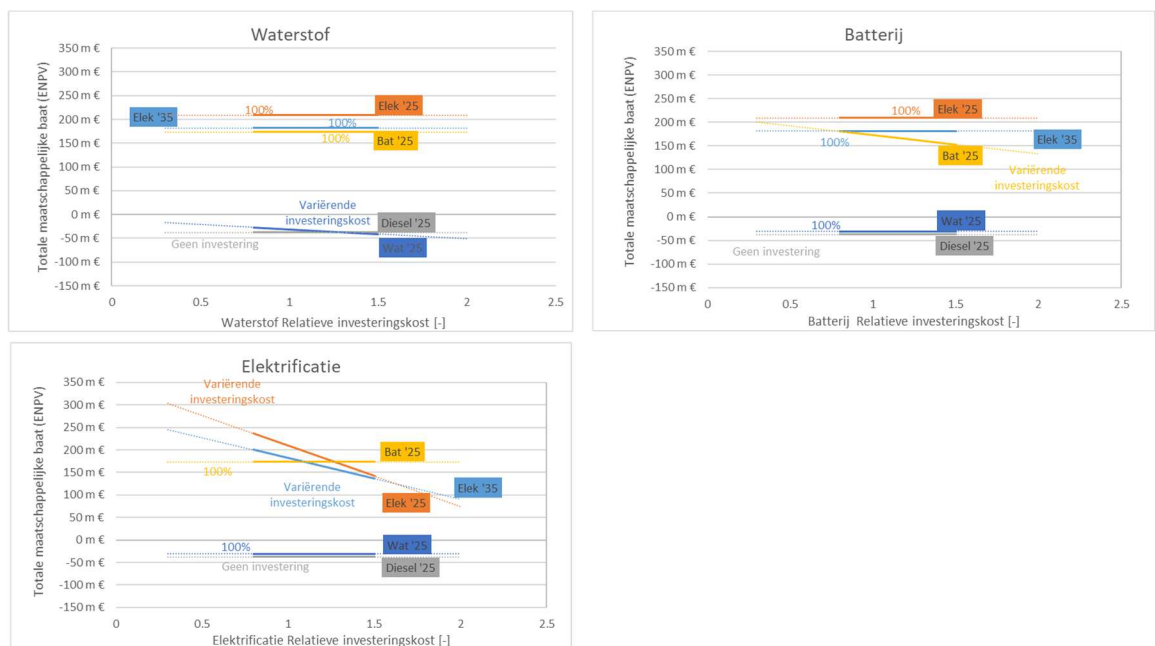
Een andere potentieel belangrijk element is dat er treinen uit de bestaande (generische) elektrische vloot kunnen ingezet op de nieuw geëlektrificeerde trajecten. Daarnaast moet men géén of slechts een beperkte reservestock aanhouden indien men voor volledige elektrificatie gaat. We zouden dit in de sensitiviteitsanalyse (althans gedeeltelijk) kunnen vertalen in een lagere aanschafkost voor materieel op geëlektrificeerde lijnen. De impact op de grootte van de stock fungeert in 12.3.5. Dit voordeel bestaat natuurlijk niet wanneer men een gedecideerde stock van waterstoffreinen of batterijtreinen moet aanschaffen specifiek om deze lijnen te bedienen.



Figuur 37: Sensitiviteitsanalyse aanschafkosten per technologie. Horizontale (x-as): kost per treinstel in Miljoen €. Verticale as (y-as): totale maatschappelijke NPV of ENPV in miljoen euro.

12.3.4 Investeringskosten

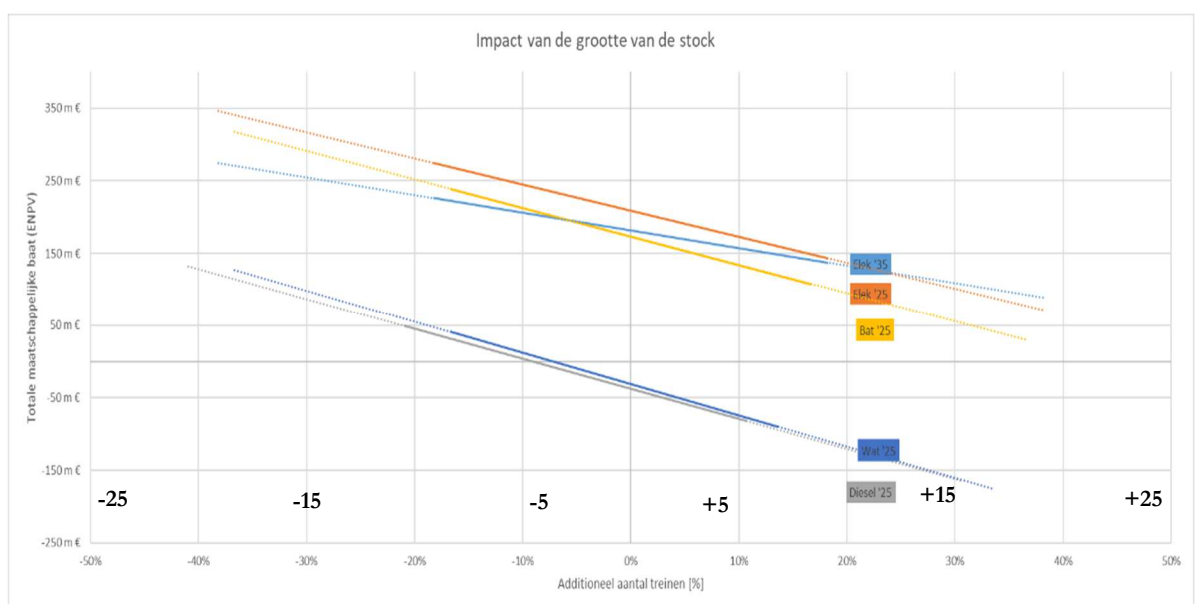
Investeringskosten spelen voornamelijk een rol bij elektrificatie, gezien we (in verhouding) weinig toegevoegde infrastructuurkosten verwachten bij het gebruik van waterstoffreinen. In de x-as van onderstaande figuren bekijken we de verhouding van de verwachte investeringskosten met de werkelijke investeringskosten. Is er een fundamentele onderschatting van de volledige elektrificatiekost, dan wordt partiële elektrificatie in combinatie met een batterijtrein het meest haalbare alternatief. Bij een werkelijke kost van meer dan 50% van de ingeschatte kost, wordt de batterijtrein overduidelijk het beste alternatief. Bij dieseltreinen is er geen noemenswaardig investeringskost in infrastructuur nodig. Een sensitiviteitsanalyse voor deze technologie en parameter wordt dan ook niet opgenomen in (Figuur 38)



Figuur 38: Sensitiviteitsanalyse aanschafkosten per technologie. Horizontale (x-as): kost per treinstel in Miljoen €. Verticale as (y-as): totale maatschappelijke NPV of ENPV in miljoen euro.

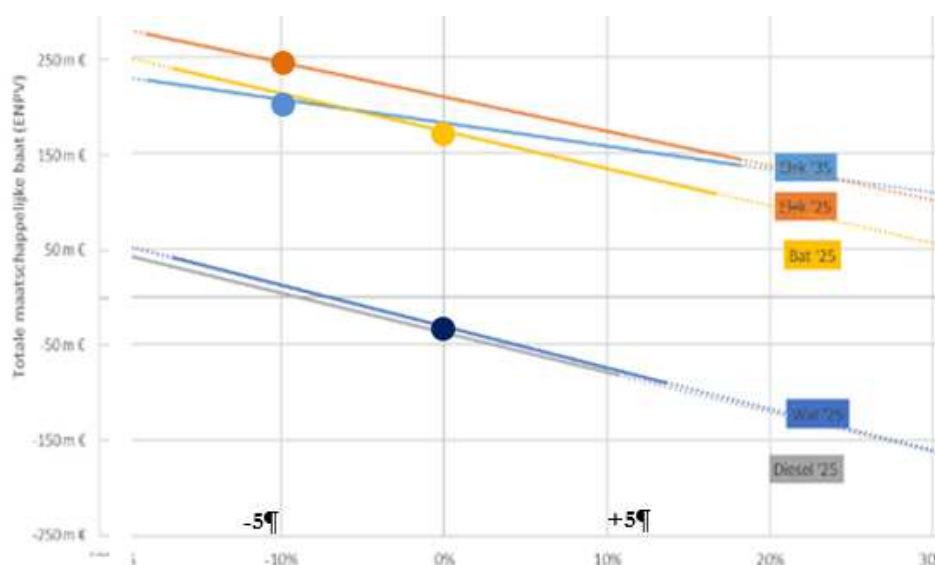
12.3.5 Impact grootte stock

De grootte van de stock speelt een relatief beperkte rol in de analyse. We gaan initieel uit van 50 rytuigen. Maar de grootte van de stock kan een grote invloed hebben op hoe we de scenario's ten opzichte van elkaar bekijken. In de figuur hieronder (Figuur 39) bekijken we de maatschappelijke baat (in ENPV) van de verschillende scenario's bij variaties in de stock. Op de x-as staat deze zowel uitgedrukt in % afwijking van de verwachte stock (50 rytuigen) en in absolute aantallen. De scenario's worden hier samen bekeken. Logischerwijze stijgt de maatschappelijke baat sowieso indien er een kleinere stock nodig is, aangezien minder treinen moeten aangeschaft en in roulatie moeten worden gehouden.



Figuur 39: Sensitiviteitsanalyse van de grootte van de stock. Horizontale (x-as): additioneel aantal treinen in %. Verticale as (y-as): totale maatschappelijke NPV of ENPV in miljoen euro.

Voor sommige scenario's speelt de grootte van de stock echter meer mee. Vooral in de ranking van de elektrische en partieel geëlektrificeerde (batterijtrein) trajecten. Is er bijvoorbeeld een kleinere stock nodig in het geval van gebruik van puur elektrische (niet-batterij) treinen, dan maakt dit een snellere en volledige elektrificatie van de lijnen interessanter. Daarnaast onderschatten we misschien de hoeveelheid batterijtreinen die we moeten aanschaffen om een effectieve en betrouwbare dienstverlening te garanderen. Dit speelt natuurlijk in het nadeel van dit scenario. Aangezien de scenario's met volledige en partiële elektrificatie vrij gelijkaardig scoren, maakt dit veel uit in de uiteindelijke ranking van deze scenario's. We tonen dit in meer detail in onderstaande figuur (Figuur 40). In deze figuur duiden we aan hoe de scenario's met volledige elektrificatie scoren indien we uitgaan van een structureel lagere benodigde stock (minus 5 treinen in het geval van elektrificatie).



Figuur 40: Impact kleinere reservestock bij volledige elektrificatie. Horizontale (x-as): additioneel aantal treinen in %. Verticale as (y-as): totale maatschappelijke NPV of ENPV in miljoen euro.

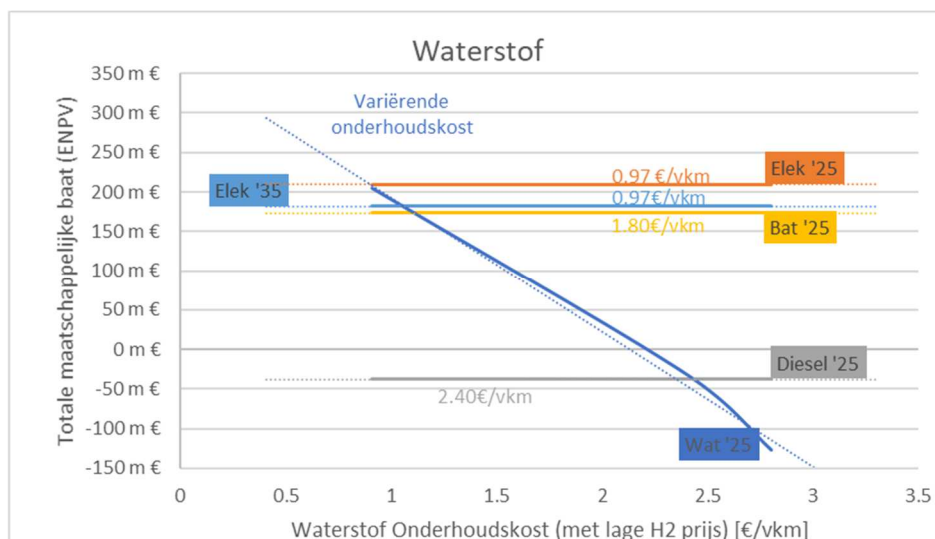
De maatschappelijke baat (ENPV) van het Elek 2025 scenario en Elek 2035 scenario nemen hierdoor toe (zie Figuur 40), wat aangeduid is (in de figuur) met een 'bol'. De ENPV stijgt in dit geval naar bijna €250 miljoen in het Elek 2025 scenario en iets minder dan €200 miljoen in het Elek 2035 scenario. De impact op het Elek 2025 scenario is relatief gezien groter, omdat de investeringen in rollend materieel sneller (10 jaar eerder) plaatsvinden.

De inzet van een generische stock in het geval van volledige elektrificatie en de nood om een géén of een kleinere (gedeelde) reservevloot te moeten hanteren zijn voordelen die niet snel mogen genegeerd worden.

12.3.6 De ideale waterstoffrein

Gegeven de informatie hierboven, zou men zich kunnen afvragen onder welke omstandigheden de waterstoffrein mogelijk wel interessant kan zijn. **Uit de analyse blijkt dat hiervoor zowel de energiekosten als de onderhoudskosten minimaal moeten zijn** (€2/kg waterstof, zodoende een energiekost niet hoger dan €0.46/vkm en onderhoudskost €0.91/vkm). Daarnaast moet men een hoge waardering voor (lokale) emissies hanteren (zoals in alle bovenstaande voorbeelden). In dit geval presteert de waterstoffrein zo goed als gelijk met het meest batige scenario (elektrificatie in 2025). **De**

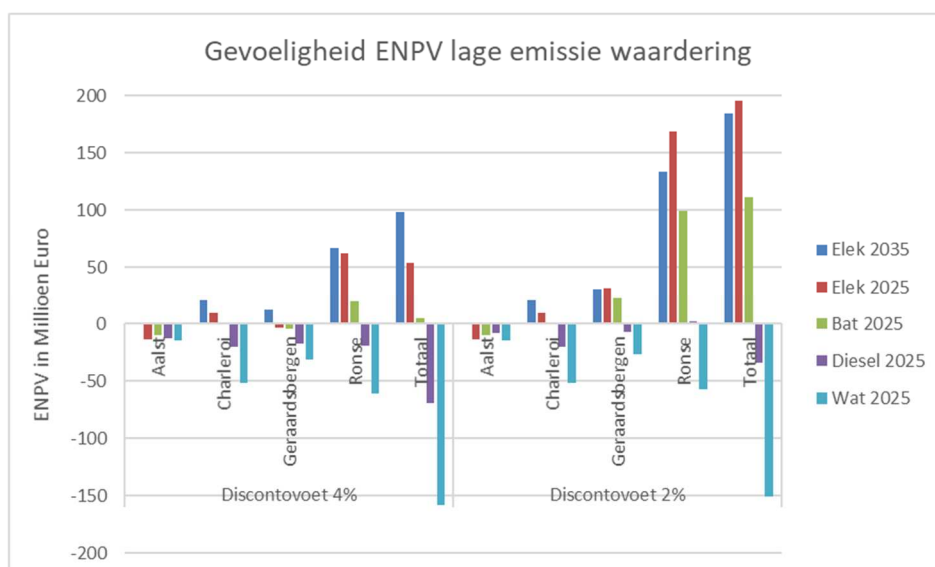
waterstoffrein heeft in dit geval nog steeds een klein nadeel in onderhoudskosten, energiekosten en aankoopkosten ten opzichte van een puur elektrisch alternatief. Dit wordt echter teniet gedaan door de hoge investeringskost bij elektrificatie. De meeste commerciële verkoopargumenten van de waterstoffrein hanteren een dergelijke set parameters. Hoewel dit niet volledig onrealistisch is, moeten we dit toch kritisch bekijken.



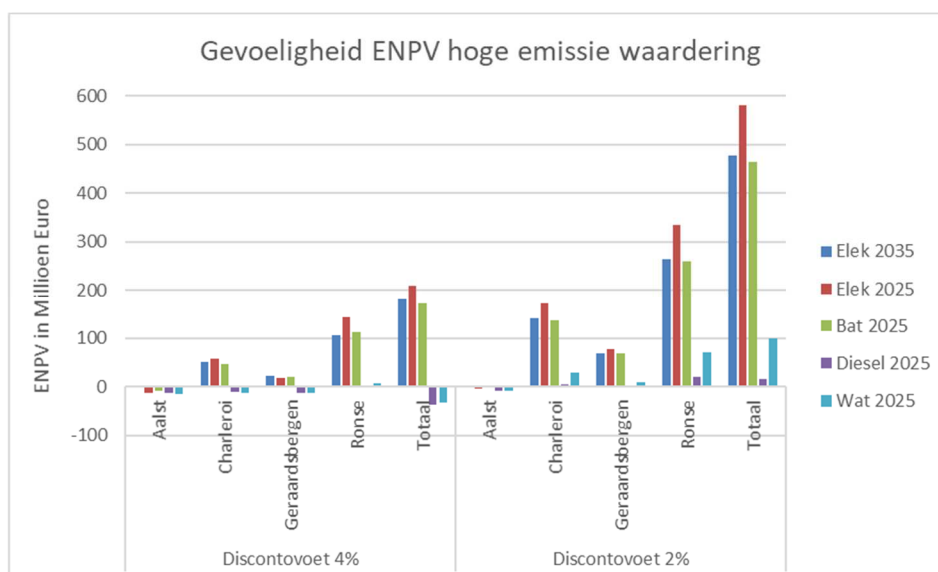
Figuur 41: Combinatie van lage energiekost en lage onderhoudskost bij waterstoffrein ('ideale' situatie) x-as: onderhoudskosten in €/vkm, y-as: Maatschappelijke baat (ENPV) in miljoen €

12.3.7 Impact discontovoet

Een laatste element in de analyse dat we nog niet bekeken hebben is de gevoeligheid van het resultaat voor de aangenomen sociale discontovoet. In alle bovenstaande analyses gebruiken we een waarde van 4%. Het kan echter relevant zijn om te onderzoeken wat er gebeurt indien we een lagere waarde hanteren. Dit zorgt ervoor dat toekomstige baten, zowel qua milieu als onderhoud en energiekosten, sterker doorwegen. We passen hieronder onze analyse aan, waarbij we uitgaan van een lagere discontovoet van 2%. We doen dit zowel voor het 'lage waardering' als 'hoge waardering' scenario variant



Figuur 42: Impact lagere discontovoet op ENPV - lage emissiewaardering



Figuur 43: Impact lagere disconto voet - hoge emissiewaardering

Met een lagere disconto voet waarderen we de mogelijke toekomstige baten hoger. Dit zorgt ervoor dat alle scenario's beter scoren ten opzichte van het 'Nul' scenario. Deze impact is natuurlijk sterker indien we dit ook combineren met een hogere waardering voor emissies (Figuur 43). We merken op dat in het geval van een disconto voet van 2%, alle scenario's hoger scoren dan het 'Nul' scenario. Zelfs Diesel 2025 en Waterstof 2025. Een ander element dat sterk opvalt, is dat nu zowel voor de lage als de hoge variant van emissiewaarderingen het Elek 2025 scenario hoger scoort dan het Elek 2035 scenario (Figuur 42). Dit komt omdat de relatieve milieubaten van vroeger elektrificeren en dieseltreinen uifaseren nu sterker doorwegen. Een lagere disconto voet hanteren werkt dus grotendeels op dezelfde manier als een hogere emissiewaardering gebruiken.

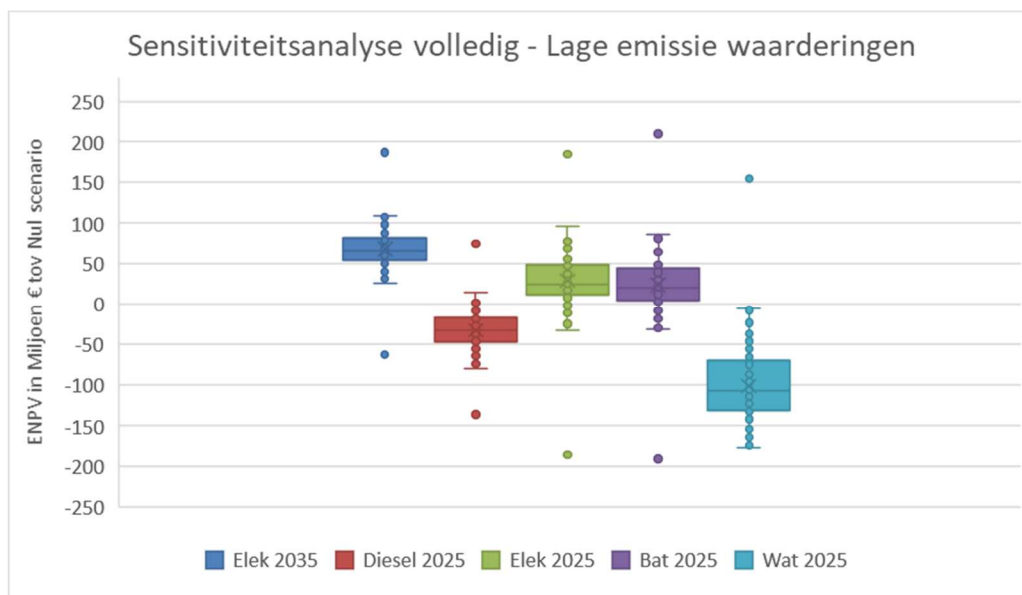
12.4 Monte-Carlo analyse

Als laatste stap in de analyse generen we een grotere set resultaten, waarbij we aannemen dat de kentallen worden getrokken uit een driehoeks distributie, waarbij men de onder- en bovengrenzen hanteert uit Tabel 36. Hieruit worden een set van gerandomiseerde waardes getrokken uit de distributie en telkens een nieuwe uitkomstwaarde (IRR, NPV of B/C) berekend. Dit gebeurt een vast aantal keren, in dit geval worden voor elk scenario 200 waarden 'getrokken'. Dit geeft een inzicht in de distributie van de voornaamste uitkomstparameters van de investering wat een 'Monte Carlo' analyse wordt genoemd. Het voordeel van deze methode is dat ze met een minimum aan informatie een bijkomend inzicht kan geven in de mogelijke verdeling van de uitkomsten.

De resultaten van de volledige Monte Carlo analyse stellen we op een vereenvoudigde manier voor, door gebruik te maken van een Box-plot. Deze geeft een gemakkelijk te interpreteren voorstelling van de distributie van de resultaten. De 'box' in het midden is begrensd door het eerste en derde kwartiel van de resultaten met de middenlijn als mediaan. Een x in de plot toont de waarde van het gemiddelde. De lijn naar boven en naar beneden is begrensd door 9% en 91% van de waardes. Punten tonen extreme resultaten (outliers). De Best case en Worst case waardes uit Tabel 37 worden hierbij ook getoond als outliers. We onderscheiden opnieuw de analyse met lage waarderingen (Figuur 45) en hoge waarderingen (Figuur 44).

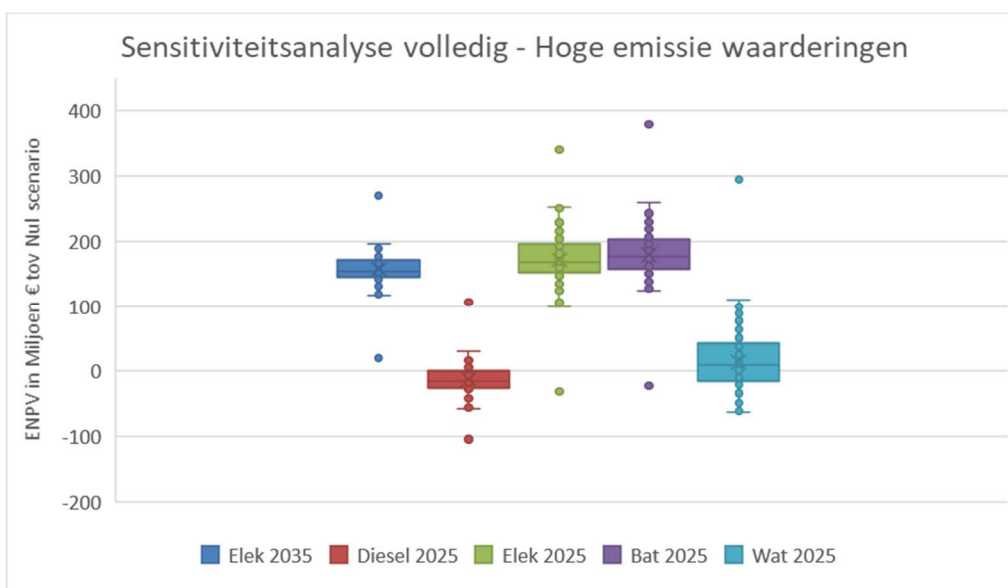
Maken we gebruik van de lagere emissiewaarderingen van het Planbureau, dan zien we dat de meeste scenario's gemiddeld weinig baten tonen ten opzichte van het Nul scenario. Zo blijkt de case van

afbouw van dieseltractie na 2035 toch sterk afhankelijk van de waardering van de emissiewaardes. Enkel volledige elektrificatie vanaf 2035 scoort significant beter dan het Nul scenario. Het gebruik van de batterijtrein of snellere elektrificatie na 2025 heeft een gelijkaardige (kleine) baat. Niet verwonderlijk scoort ook het scenario met waterstoffrein hier relatief slecht. Het ‘best case’ scenario (hier als outlier) troont echter wel sterk uit boven de gemiddelde waarde.



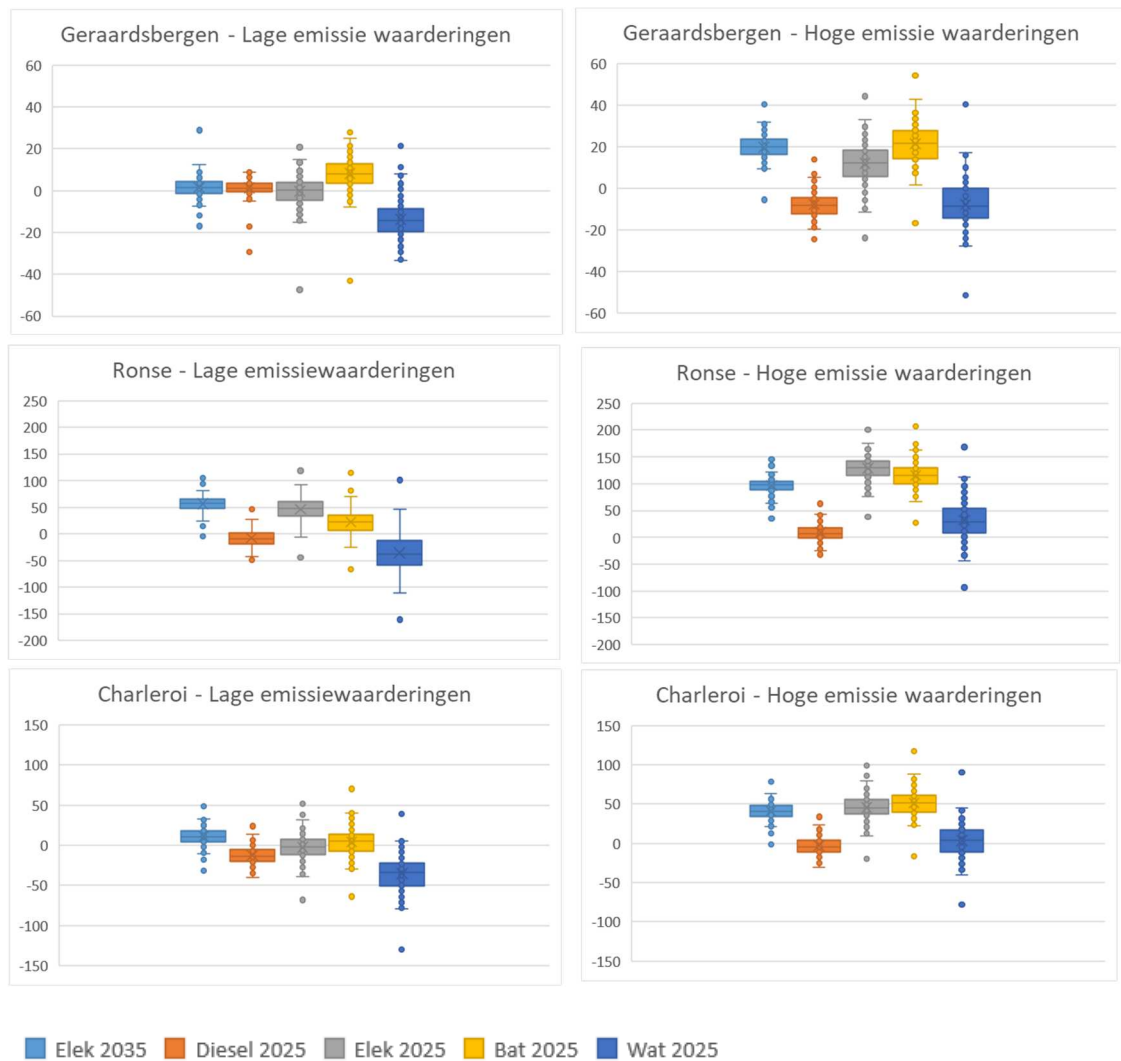
Figuur 44: Sensitiviteitsanalyse met lage waarderingen - Monte Carlo

De resultaten met hoge emissiewaarderingen volgen hieronder (Figuur 45). Kiezen voor nieuwe dieseltreinen in 2025 is een weinig interessant scenario dat echter ook weinig risico's inhoudt. **Elektrificatie vanaf 2025 (Elek 2025) scoort marginaal beter dan elektrificatie vanaf 2035 en heeft een sterkere positieve verdeling. Het gebruik van batterijtreinen (Bat 2025) scoort nu het beste van alle scenario's. De reden is dat we in de sensitiviteitsanalyse rekening houden met de mogelijkheid van meerkosten bij de investering in elektrificatie. Dit risico is beperkter bij het gebruik van batterijtreinen, maar natuurlijk niet onbestaande. De grootste positieve en negatieve afwijkingen zien we bij het gebruik van waterstoffreinen.** Dit betekent dat het ook de meest risicovolle investering is, gezien de onzekerheden die samengaan met de ontwikkeling van de waterstofeconomie (in dat geval rond de cluster Gent). De mediaan en het gemiddelde van de resultaten van waterstoffreinen is echter hoofdzakelijk negatief, waarbij vooral de 'best case' een positieve vertekening geeft van het resultaat.



Figuur 45: Sensitiviteitsanalyse met hoge waarderingen - Monte Carlo

zet de resultaten van de Monte Carlo analyse nogmaals uit voor de drie belangrijkste lijnen (Eeklo-Ronse, Geraardsbergen-Gent en Charleroi-Couvin). De analyse bij de lijn Aalst-Burst was overbodig door de kleine absolute variatie in de resultaten en het beperkt gebruik van deze lijn. We zien dat voor Charleroi-Couvin en Geraardsbergen-Gent de batterijvarianten gemiddeld iets beter scoren dan volledige elektrificatie. Bij de lijn Eeklo-Ronse is dit de variant met volledige elektrificatie van het net. Ook hier speelt voornamelijk de onzekerheid over de totale kost van elektrificatie een belangrijke rol. We gaan hierop in meer detail in bij de parameter analyse in paragraaf 12.3.



Figuur 46: Resultaten Monte Carlo analyse per lijn – op y-as: ENPV in Miljoen euro

13 Conclusies

Dit rapport bevat een analyse van de opties tot ontdieseling van de resterende niet-geëlektrificeerde spoorlijnen in België. We doen een uitgebreide analyse van de passagierslijnen. Deze lijnen situeren zich voornamelijk rond Gent (Eeklo-Ronse, Gent-Geraardsbergen, Aalst-Burst) en Charleroi-Couvin. We voeren ook een quickscan uit van de goederenlijnen Genk-Bilzen (21c), Gent-Terneuzen (204) en Gent-Wondelgem-Terneuzen (55). We starten de studie met een uitgebreid literatuuroverzicht van gelijkaardige projecten. We zetten onze keuze van kentallen uiteen en wijden kort uit over de theorie van de keuze tussen verschillende alternatieven. We gaan voort met een uiteenzetting van de resultaten, zowel per cluster als voor het gehele netwerk. We eindigen met een zeer uitgebreide sensitiviteitsanalyse.

Uit de literatuurstudie komen de volgende conclusies. Duurzame alternatieven voor elektrische passagierstreinen worden momenteel commercieel beschikbaar, zodat ze een reële mogelijkheid tonen om kosten te besparen en de duurzaamheid van het spoornetwerk verder te verbeteren. De haalbaarheid is echter sterk situatie-afhankelijk. Zo werd in een gelijkaardig project in Groningen en Friesland eerst een keuze gemaakt voor partiële elektrificatie en batterijtreinen, waarna er toch werd gekozen voor testen met waterstoftreinen. Dit werd echter vooralsnog nog niet vertaald in een permanente use case. In Duitsland is in sommige regio's de kost van elektrificatie zodanig hoog dat dit bij voorbaat wordt uitgesloten. Waterstof heeft dan als een quasi infrastructuurloze technologie een belangrijk voordeel. Vanuit de industrie is er veel interesse voor waterstof. Deze ziet vooral mogelijke synergiën met het energienetwerk, chemische industrie en waterstof als brandstof en tijdelijke energieopslag. De rol van het spoor om de opgang van deze industrie te katalyseren moet echter niet overschat worden, gezien de relatief beperkte grootte van het spoor ten opzichte van de totale vervoerseconomie. Daardoor is het spoor vooral een 'volger' in de industriële ontwikkeling.

Waar de alternatieven voor volledige elektrificatie in passagierstreinen redelijk op punt staan, is het zoeken naar alternatieven voor dieseltreinen bij goederentransport. Door het veel grotere vermogen dat goederentreinen moeten opwekken en de lange afstanden die deze moeten afleggen, lijkt het gebruik van batterijen op dit moment weinig interessant. De huidige batterijen zijn té zwaar en kunnen té weinig energie dragen. De optie van een duale motor die zowel diesel als elektriciteit gebruikt lijkt hier een mogelijk alternatief. Een potentieel aantrekkelijke optie is de dual fuel Vectron locomotief. Daarnaast lijkt het gebruik van waterstof hier potentieel interessant, omdat waterstof wel een erg hoge energiedichtheid heeft per kg. Een mogelijkheid die nu onderzocht wordt, is om waterstof rechtstreeks in een klassieke hoog vermogen diesel verbrandingsmotor te injecteren. Dit blijkt een vrij efficiënte motor te geven.

Bekijken we de verschillende beschikbare technologieën kunnen we stellen dat volledige elektrificatie de hoogste initiële investering vraagt in het netwerk. De gebruikskost van elektrische treinen is echter de laagste, zowel in onderhoud als energie. Daarnaast heeft een puur elektrische trein ook de laagste milieukosten. Daardoor zal theoretisch gezien volledige elektrificatie de laagste maatschappelijke kosten presenteren indien het traject intensief genoeg gebruikt wordt. Bij minder intensief gebruikte trajecten -zoals de resterende dieseltrajecten in België- is de investering in het traject mogelijk te groot in verhouding met baten op gebied van energie en onderhoud. Het gebruik van een batterijtrein kan het best worden vergeleken met partiële elektrificatie, gezien deze treinen toch steeds een minimale tijd onder een bovenleiding moeten kunnen rijden om op te laden. Doordat de batterij in de levensduur van de trein toch ongeveer twee keer moet vervangen worden, is de gebruikskost van de batterijtrein hoger. Wat men dus uitspaart in netwerkkosten, wordt gedeeltelijk verhaald in onderhoud

en vervanging van de batterij. Deze situatie lijkt nog extremer in het geval van waterstofreinen. Waar de investering in het traject bij waterstofreinen laag tot erg laag is, zijn de onderhoudskosten van waterstofreinen veel hoger, door de kwetsbaarheid van brandstofcellen. Deze moeten ongeveer elke twee jaar vervangen worden. Het quasi totaal gebrek aan netwerk en tankinfrastructuur voor waterstof zullen leiden tot hoge kosten voor waterstof als energiebron. Daarnaast kan het milieuvoordeel van waterstof mogelijk overschat worden, omdat er veel energie verloren gaat in de synthese en opslag van waterstof ten opzichte van het direct gebruik van (hernieuwbare) energie.

Concreet vergelijken we zes scenario's in deze studie met een 'Nul' scenario waarbij we uitgaan van een verder gebruik van dieseltreinen voorbij 2035. In het Elek 2035 scenario gaan we uit van elektrificatie van het traject in 2035. De vijf andere scenario's zijn (steeds met startjaar 2025), Elek 2025 (elektrificatie), Diesel 2025 (nieuwe dieseltrein), Bat 2025 (batterijreinen), Wat_5 2025 (waterstofrein, prijs waterstof €5/kg) en Wat_2 2025 (waterstofrein, prijs waterstof €2/kg). Daarnaast gebruiken we nog twee varianten naar emissiewaardering: een lagere emissiewaardering gehanteerd door het Planbureau en een hogere emissiewaardering op basis van een CE Delft studie voor DG Move.

We gebruiken de volledige maatschappelijke baat als richtlijn voor de waarde van de investering (ENPV). De scenario's met volledige elektrificatie (zowel in 2035 als in 2025) als de partiële elektrificatie in 2025 (batterijrein) scoren zeer gelijkaardig in termen van totale maatschappelijke baat. Met een lage waardering voor emissies is volledige elektrificatie in 2035 de beste optie met een totale maatschappelijke baat van €84 miljoen (over alle besproken lijnen). Niet onbelangrijk, is dit ook het enige scenario met een mogelijk positieve financiële baat voor het spoor in het algemeen. Dit komt omdat het maximum uit de bestaande stock (MW 41) wordt gehaald, waarna het elektrisch alternatief leidt tot lagere energie- en onderhoudskosten ten opzichte van dieseltechnologie.

Indien we ervoor kiezen om emissies hoger te waarderen, blijkt de volledige elektrificatie in 2025 de beste optie, met een maatschappelijke baat van €209 miljoen ten opzichte van het nul scenario. De reden is dat we in dit geval sneller (10 jaar eerder) een relatief hoge milieubaat kunnen realiseren. Wat we in dit scenario dus doen is een hogere publieke investeringskost afwegen tegen lagere milieukosten (minder emissies afkomstig van dieseltreinen). Het Elek 2035 (€182 miljoen) en het gebruik van batterijreinen (€173 miljoen) scoren vrij gelijkaardig. Vervanging met dieseltreinen (€-37) of 'dure' waterstof (€-31 miljoen) scoren negatief ten opzichte van het nul scenario. In het Wat_2 scenario (€48 miljoen) is er wel een baat, maar deze is kleiner dan de andere alternatieven. Over het algemeen lijken waterstofreinen onder de huidige technologische randvoorwaarden, weinig toegevoegde waarde te hebben ten opzichte van (mature) dieseltechnologie.

Splitsen we het resultaat uit naar deellijnen, dan blijkt de elektrificatie van Eeklo-Ronse het meest batige deelproject (€145 miljoen in het Elek 2025 scenario). Investerings in Aalst-Burst scoren over de grote lijn negatief door het beperkte gebruik van dit traject. Het traject van Gent-Geraardsbergen en Charleroi-Couvin blijken gunstiger voor partiële elektrificatie met batterijrein.

We voerden eveneens een uitgebreide systemische sensitiviteitsanalyse uit. Deze ging verder dan veel gelijkaardige studies, maar was noodzakelijk om tot een consistent en betrouwbaar rapport te komen. Deze analyse voeren we uit in drie stappen. Eerst zetten we realistische boven- en ondergrenzen aan de belangrijkste kentallen om de potentiële best en worst case van elk scenario te bepalen. Daarna bekijken we de invloed van verschillende parameters op het resultaat in zogenaamde 'ceteris paribus' condities. Als laatste stap doen we een volledige Monte-Carlo analyse waarin 'waarschijnlijke' uitkomsten worden bepaald voor elk scenario.

De sensitiviteitsanalyse voegt veel inzicht toe aan de studie, maar leidt niet tot wezenlijke veranderingen in de conclusies. Omdat de baten van varianten met (partiële) elektrificatie redelijk dichtbij elkaar liggen kunnen deze wel tot verschillen in ranking van de scenario's leiden. De elektrificatiekost (initiële investering) is hier een essentiële parameter. Als deze tot 50% (of hoger) uitvalt dan de initiële inschatting lijkt partiële elektrificatie (Bat 2025) beter te scoren. Anderzijds laat volledige elektrificatie met bovenleiding toe om een minder grote reservevloot aan te leggen of een generische stock te gebruiken, wat natuurlijk in het voordeel van de klassieke elektrische trein speelt. Als dit voordeel gerealiseerd wordt dan neemt de aantrekkelijkheid van (vroeg) elektrificeren nog toe. Hiernaast spelen onzekerheden over de aanschaf- en onderhoudskosten van batterijtrenten. De Monte-Carlo analyse toont ons aan dat deze voor- en nadelen elkaar ongeveer neutraliseren, waarbij de elektrificatiekost mogelijk iets meer doorweegt. Hierdoor scoort de batterijoptie gemiddeld iets beter.

De technologie die de grootste vraagtekens blijft afroepen is deze van de waterstoffrein. De analyse geeft aan dat dit de meest risicovolle investering is. Enkel in optimale omstandigheden (hoge investeringskosten in bovenleidingen/laadstation, lage onderhoudskosten en lage prijs van waterstof) zullen waterstoffrenten goed scoren, maar dit blijft een situatieafhankelijk resultaat. Wat hier ook meespeelt is het gebrek aan een tankinfrastructuur en een zogenaamde 'industriële ecologie' voor waterstofsynthese. Hoewel deze in Gent mogelijk in het volgende decennium zal ontwikkeld worden, lijkt in deze cluster elektrificatie een betere optie, omdat al veel trajecten een bovenleiding bezitten. Voor de lijn Charleroi-Couvin zijn de kosten en risico's van elektrificatie hoger door het moeilijkere terrein en het volledig gebrek aan bovenleidingen langs het traject. Dit kan ook in het nadeel van een batterijoptie spelen. In principe is het potentieel voor waterstof dus groter voor de lijn Charleroi-Couvin, maar vooralsnog lijkt het onwaarschijnlijk dat er op grote schaal waterstofsynthese zal plaatsvinden. We wijzen in het rapport wel naar potentiële synergiën met andere projecten, bijvoorbeeld het testproject waterstoffbussen in samenwerking met Engie en de afvalverwerker Tibi.

Onze finale conclusie is dat (volledige) elektrificatie van de resterende diesellijnen een potentieel grote maatschappelijke baat oplevert. We raden dus ten eerste aan om op termijn volledig af te stappen van dieseltrenten, zelfs indien deze dieseltrenten aan hogere standaarden voldoen als de huidige MW 41. Er is echter weinig verschil in baten tussen een scenario waarbij deze pas in 2035 of al in 2025 wordt uitgevoerd. De keuze ligt hierbij voornamelijk bij de beleidsmaker en in welke mate de plaatselijke negatieve impact (voornamelijk rond Gent) van dieseltrenten op de agenda komen staan. Indien er wordt beslist tot elektrificatie, raden we aan om de lijnen tussen Eeklo, Gent en Ronse te prioriteren. De exploitatie van de lijn Aalst-Burst wordt best gezien als een deel van een ander project. De lijn is té beperkt om als een 'eiland' te worden gezien.

De meest beloftevolle alternatieve technologie zijn batterijtrenten. Indien er indicatie bestaat dat de kosten van elektrificatie de schattingen in dit rapport sterk zouden kunnen overschrijden, moet vooral naar deze technologie worden gekeken. Dit lijkt het meest waarschijnlijk in het geval van de lijn Charleroi-Couvin. Batterijtrenten zijn op dit moment het beste alternatief voor een volledige elektrificatie van het net, toch mag men niet onderschatten in welke mate er nog aanpassingen aan het netwerk nodig zijn, voornamelijk door relatief dure laadinfrastructuur en de onzekerheden die hiermee verbonden kunnen zijn. Hier moet voornamelijk de operator bijkomend de afweging maken tussen de voordelen van het kunnen inzetten van elektrische treinen uit de bestaande stock of toegang te hebben tot een stock van treinen die ingezet kunnen worden onder omstandigheden waarbij de bovenleiding ontbreekt of beschadigd is (zowel op de lijnen besproken in dit rapport of andere lijnen).

Het voornaamste voordeel van waterstoffrenten is dat deze operationeel sterk vergelijkbaar zijn met dieseltrenten. Deze treinen zijn dus algemeen inzetbaar, tenminste indien de tankinfrastructuur

aanwezig is. Waar afwezig kan bijvoorbeeld een tankstation op trailer een (tijdelijke) oplossing vormen. Toch wijzen we in dit rapport eerder op de risico's, omdat de waterstoffrein op dit moment geen groot extra voordeel lijkt te bezitten ten opzichte van (nieuwe) dieseltreinen. Daarenboven mag men zich niet blind staren op de gunstige evolutie van de energiekost van (groene) waterstof, zonder daarbij de ontwikkelingen in brandstofcellen mee te nemen. We schrijven waterstoftechnologie wel niet zonder meer af. We refereren in het rapport naar een mogelijke synergie met het pilootproject BeHydro dat een hybride diesel/waterstofaandrijving heeft ontwikkeld voor gebruik in de haven van Gent. We verwijzen ook naar een proefproject waterstofsynthese in Charleroi.

In een quickscan analyse bestuderen we de case voor de elektrificatie van lijn 21c Genk-Bilzen, lijn 204 Gent-Terneuzen en lijn 55 Wondelgem-Terneuzen. Voor lijn 21c tonen we aan dat de maatschappelijke baat van de elektrificatie inderdaad aanzienlijk is. De beslissing om het traject te elektrificeren werd door Infrabel bevestigd, in het verlengde van de elektrificatie van de lijn Mol-Hamont. De elektrificatie van lijn 204 lijkt potentieel interessant. Hier moet vooral nagekeken worden of een optie voor passagierstransport op deze lijn uiteindelijk weerhouden zal worden. In dit rapport werd hier geen apart onderzoek naar uitgevoerd, maar werd verwezen naar de studie van Goudappel-Coffeng (2018). In het geval van lijn 55 lijkt de elektrificatie dan weer eerder niet interessant, tenzij er een grote stijging van de transportvraag op deze lijn zou kunnen gerealiseerd worden.

14 Referenties

- Arcadis, 2018. Haalbaarheidsstudie zero emissie treinen met opportunity charging
- Baumgartner J.P, 2001. Prices and costs in the railway sector, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
- CE Delft, 2019. Handbook on the external cost of transport, prepared for DG MOVE
- Delhay E., De Ceuster G., Vanhove F., Maerivoet S., 2017, Internalisering van externe kosten van transport in Vlaanderen
- DG Regio, 2014. A guide to cost benefit analysis of Investment projects. Economic appraisal tool for Cohesion Policy
- Federaal Planbureau, Vito, 2016. De milieu-impact van de evolutie van de transportvraag tegen 2030
- Gattuso D., Restuccia A., 2014. A tool for railway transport cost evaluation, Procedia - Social and Behavioral Sciences 111 (2014) 549 – 558
- Goudappel-Coffeng, 2018. Passagiersvervoer Rail Gent –Terneuzen | Eindrapport
- Hoffrichter A., Miller M., Hillmansen S, Roberts C., 2012. Well-to-wheel analysis for electric, diesel and hydrogen traction for railways, Transportation Research Part D 17 (2012) 28–34
- Network Rail, 2020, Traction Decarbonisation Network Strategy
- Riccardo Rail Nederland, 2016. Verkenning elektrificatie Noordelijke diesellijnen
- Roland Berger, 2019. Study on the use of hydrogen & fuel cells in the railway environment, Shift2Rail project – report 1
- Roland Berger, 2017. Fuel Cells and Hydrogen Applications for Regions and Cities Vol. 2
- Simian B., 2018, Le verdissement des matériels roulants du transport ferroviaire en France
- VDE, 2020. Evaluation of climate-neutral alternatives to diesel multiple units. Economic viability assessment based on the example of the Düren network.
- Witteman N. T., Meinelt F., 2019. Bewertung von konventionellen und alternativen Antrieben für den Rheinland-Pfalz Takt 2030 unter besonderer Betrachtung des Pilotprojekts „Pfalznetz“