

Autorisatieblad

Movares (2020). Verkenning Electric Road Systems

	Naam	Akkoord	Datum
Opgesteld door	Chang, MF	✓	1-12-2020
Gecontroleerd door	Labrujere, EA	✓	14-12-2020
Vrijgegeven door	Minkman, JA	✓	15-12-2020

Op dit autorisatieblad ontbreken de handtekeningen wegens de digitale verwerking van ons vrijgaveproces. Dit rapport is aantoonbaar vrijgegeven.

Gehanteerde afkortingen

In dit rapport worden de volgende afkortingen gehanteerd:

BEV	Batterij Elektrisch Voertuig
CO ₂	Koolstofdioxide
ERS	Wegen waarop voertuigen tijdens het rijden elektriciteit kunnen laden (Electric Road Systems)
Euro VI	Actuele Europese emissienorm voor zware bedrijfswagens boven 3.5 ton
FCEV	Brandstofcel elektrisch voertuig (Fuel Cell Electric Vehicle)
GJ	Gigajoule (10 ⁹ Joule), energie eenheid
H ₂	Waterstof
HEV	Hybride Elektrisch Voertuig
HPDI-motor	Motor met directe hogedrukinjectie (High Pressure Direct Injection)
LBG	Vloeibaar biogas (liquefied bio gas)
LNG	Vloeibaar aardgas (liquefied natural gas)
MIRT	Meerjarenprogramma Infrastructuur, Ruimte en Transport
MJ	Megajoule (10 ⁶ Joule), energie eenheid
MW	Megawatt (10 ⁶ Watt), vermogenseenheid
O-BEV	Batterij Elektrisch Voertuig met de mogelijkheid om elektriciteit te laden via een bovenleiding (overhead catenary)
O-BEV 100	Batterij Elektrisch Voertuig met de mogelijkheid om elektriciteit te laden via een bovenleiding (overhead catenary), en 100 km elektrische actieradius
O-HEV	Hybride Elektrisch Voertuig met de mogelijkheid om elektriciteit te laden via een bovenleiding (overhead catenary)
PEM	Proton uitwisselingsmembraan (Proton Exchange Membrane)
TCO	Aanschaf- en exploitatiekosten gebruiker (Total Cost of Ownership)
TEN-T	Trans Europees Netwerk Transport
TRL	Mate van ontwikkeling van een technologie (Technology Readiness Level)
TTW	Deel energieketen van brandstoftank tot de wielen (Tank To Wheel)
WTT	Deel energieketen van brandstofwinning tot de tank (Well To Tank)
WTW	Deel energieketen van brandstofwinning tot de wielen (Well To Wheel)

Samenvatting

In het Klimaatakkoord van 2019 heeft Nederland zich gecommitteerd tot een CO₂-emissiereductie van 49% per 2030 ten opzichte van 1990. In de transportsector is de uitstoot sinds 1990 echter toegenomen. De zogeheten Electric Road Systems (ERS) kunnen bijdragen aan de verduurzaming van het wegtransport door voertuigen van elektriciteit te voorzien tijdens het rijden. Met ERS kunnen voertuigen op geëlektrificeerde wegen efficiënt gebruik maken van elektrische aandrijving en eventuele batterijen kunnen worden opgeladen. Ook kunnen kostbare en zware batterijen kleiner worden uitgevoerd. Buiten dit netwerk kunnen zij hun weg vervolgen met in het voertuig opgeslagen energie: in een batterij, in waterstof of in hernieuwbare of fossiele brandstoffen.

In deze studie wordt ingegaan op de vraag in hoeverre toepassing van ERS binnen het vrachtvervoer voor Nederland een aantrekkelijke optie is om bij te dragen aan het halen van de klimaatdoelstellingen. Hiertoe zijn diesel en LNG voertuigen vergeleken met batterij elektrische voertuigen met een brandstofcel (FCEV), met een omvangrijke batterij (BEV), met voeding middels een bovenleiding (OBEV) en met een diesel-hybride variant hiervan (OHEV). De belangrijkste conclusies van deze studie zijn:

Dynamisch laden met een bovenleiding (ERS-OC, OBEV) heeft, evenals de aandrijfconcepten BEV en FCEV, potentieel om bij te dragen aan de klimaatdoelstellingen van de Nederlandse overheid. Op dit moment zijn er echter te veel onzekerheden om een voorkeur voor één van deze concepten uit te kunnen spreken. Met de volledige vergroening van de Nederlandse elektriciteitsmix worden ERS-OC, BEV en FCEV CO₂ neutraal (Well To Wheel). Uitgaande van waterstofproductie op basis van elektrolyse met de huidige elektriciteitsmix, zijn de CO₂-emissies van FCEV ruim tweemaal zo hoog als van ERS-OC en BEV. Luchtkwaliteitsaspecten spelen bij deze opties niet. Wel is er sprake van slijtage van de bovenleidingen van ERS-OC. Het perspectief van LNG om aan deze doelstellingen bij te dragen is onzeker gezien de onzekere beschikbaarheid van biomethaan (LBG) voor wegtransport. Belangrijke randvoorwaarden bij een uiteindelijke keuze betreffen de beschikbaarheid van winbare grondstoffen (metalen) en de mate van circulariteit van ERS systemen, batterijen en brandstofcellen.

In hoeverre kan de overheid haar klimaatdoelen waarmaken met behulp van ERS? ERS heeft veel overeenkomsten met de andere zero emissie-opties: batterij-elektrisch en waterstof-elektrisch vrachtvervoer. Ze kunnen alle drie significant bijdragen aan verduurzaming van het wegtransport. Ook geldt voor alle drie dat er wel voldoende materialen beschikbaar moeten zijn, die bij voorkeur circulair worden gebruikt. Daarom lijkt dit vraagstuk uiteindelijk economisch van aard: welk alternatief oogt het meest economisch aantrekkelijk voor overheid en marktpartijen? Financieel gezien blijken de opties FCEV, OHEV, OBEV en BEV niet significant te verschillen: de Total Cost of Ownership (TCO) varieert tussen 1,0 miljoen en 1,1 miljoen Euro. Op basis van deze berekeningen is nog geen voorkeurst technologie aan te wijzen: de verschillen liggen binnen de onzekerheidsmarges. Wel lijken alle varianten met een elektromotor in 2030 goedkoper dan diesel.

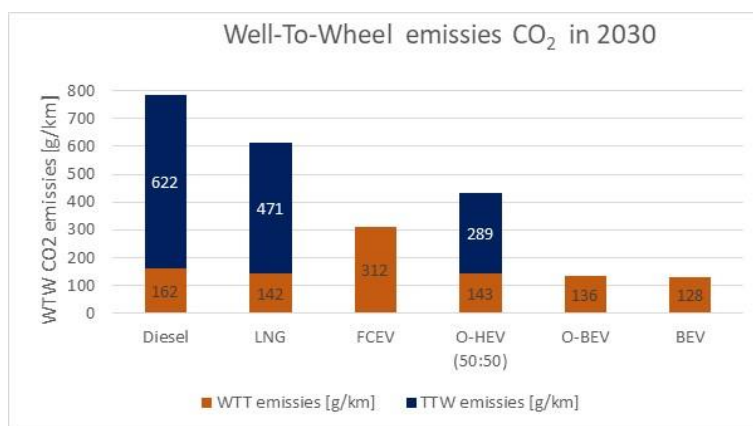
ERS systemen nog volop in ontwikkeling, ERS-OC momenteel meest marktvolwassen

ERS kan worden gerealiseerd met een bovenleiding, een rail in de weg of contactloos middels inductie. Uit pilots in onder meer Duitsland en Zweden blijkt het bovenleidingsysteem momenteel het meest marktvolwassen te zijn. De systemen zijn echter nog volop in ontwikkeling en het oogt te vroeg om een definitieve winnaar aan te wijzen.

CO₂-emissies FCEV, OBEV en BEV nemen af met verduurzaming NL elektriciteitsmix

De CO₂-emissies op een Well-to-Wheel analyse van batterij elektrische vrachtwagens met of zonder bovenleiding ontlopen elkaar niet sterk en worden bepaald door de CO₂-emissiefactor van de Nederlandse elektriciteitsmix. Gezien het huidige en voorziene Rijksbeleid t.a.v. de verduurzaming hiervan kan men aannemen dat deze emissies de komende decennia verwaarloosbaar klein zullen worden.

Dit perspectief van verwaarloosbare CO₂-emissies geldt eveneens voor de productie van waterstof door middel van elektrolyse, met de kanttekening dat deze keten minder efficiënt is. Door de lagere efficiëntie van de brandstofcel en de productie van waterstof middels elektrolyse wordt er per gereden kilometer 2,3 tot 2,4 maal zoveel CO₂ uitgestoten door een FCEV als door een OBEV of BEV, zie het volgende figuur. Hierbij is uitgegaan van waterstofproductie op basis van elektrolyse met elektriciteit uit het Nederlandse elektriciteitsnet.



Figuur 1 CO₂-emissies van verschillende aandrijfconcepten

Verduurzamingspotentieel LNG onbekend

Het verduurzamingspotentieel van LNG is momenteel onbekend. Gezien de beperkte beschikbaarheid van biomethaan en de voorziene vraag hiernaar vanuit de woningbouw en industrie ('aardgasvrij') achten wij beschikbaarheid van deze brandstof voor de transportsector twijfelachtig. Nader onderzoek is hier vereist.

Kansrijke ERS-OC trajecten zijn te vinden op de A1, A15, A16, A58 en A67

Onderzocht is welke Nederlandse rijkswegen mogelijk geschikt zijn voor ERS-OC systemen. Om te komen tot een mogelijke selectie van te elektrificeren weggedelen, is een analyse van het hoofdwegennet gecombineerd met internationale handelsroutes uit het Trans-European Network-Transportation (TEN-T). Dit heeft geleid tot de volgende potentiële trajecten voor elektrificatie:

- A1 - Amersfoort/KP Hoevelaken tot Almelo/KP Azelo (90 km)
- A15 - Rotterdam (KP Ridderkerk) tot Arnhem (104 km)
- A16 - Rotterdam tot de grens met België (46 km)
- A58 - Breda/KP Galder tot Eindhoven/KP Batadorp (48 km)
- De A67 vanaf de grens van België tot Duitsland (74 km)

Investeringskosten ERS-OC 3 mln Euro per kilometer

Lange termijn beschikbaarheid materialen en circulariteit bepalend voor systeemkeuze

TCO kosten variëren tussen 1,0 en 1,1 mln Euro in 2030

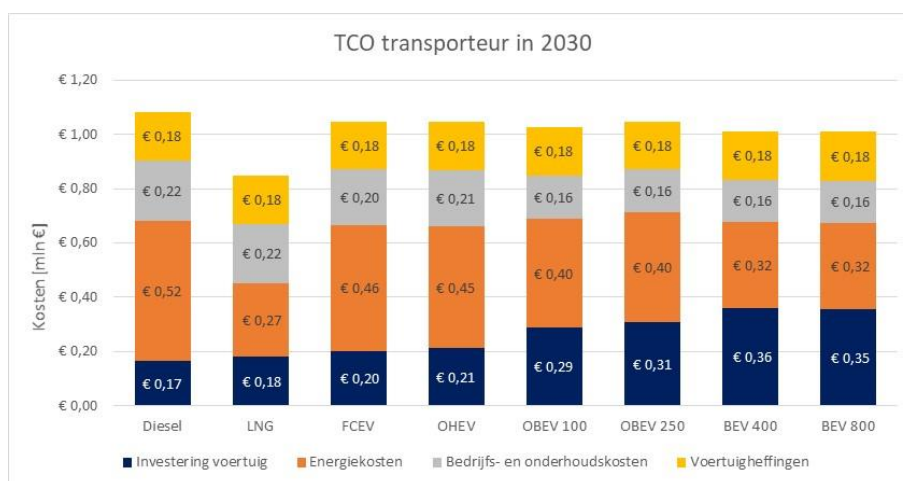
Op basis van een mogelijk traject langs de A15 zijn de kosten bepaald voor een bovenleidingsysteem. Uitgaande van 500.000 passages van ladende voertuigen per jaar (beide richtingen opgeteld) blijken deze investeringskosten ruim 3 miljoen Euro per kilometer te zijn. Belangrijk aandachtspunt hierbij is de levensduur van het systeem, en met name de slijtage van de twee rijdraden in de bovenleiding.

Hoewel het buiten de scope van dit onderzoek valt, signaleren wij het belang bij een eventuele systeemkeuze van de beschikbaarheid van winbare grondstoffen (metalen) en de mate van circulariteit van ERS systemen, batterijen en brandstofcellen. Ons inziens dient bij de keuze voor een aandrijfconcept er een redelijke waarschijnlijkheid te zijn dat het beoogde concept zonder winning van schaarse grondstoffen kan bestaan.

Om te komen tot een financiële vergelijking tussen de aandrijfconcepten zijn de aanschafkosten van het voertuig bepaald, evenals de energievraag, onderhoudskosten en heffingen. Eveneens zijn de energiekosten bepaald inclusief de kosten van de vereiste infrastructuur (tankpunten, laadpunten, laadtrajecten). Deze zijn vervolgens vergeleken op Total Cost of Ownership (TCO). Enkele bevindingen uit dit onderzoek zijn:

- Voertuig aanschafkosten lopen uiteen van bijna € 120.000 voor een diesel voertuig tot ruim € 250.000 voor een batterij elektrisch voertuig met een actieradius van 800 kilometer.
- De inkomsten van een bovenleidingsysteem worden bepaald door de prijs van de door de transporteur afgenomen elektriciteit. Indien wordt uitgegaan van een kostenneutrale exploitatie (incl. aanleg, onderhoud, beheer, in- en verkoop elektriciteit) en 500.000 passages per jaar, komt deze prijs te liggen op 20 ct per kWh.

De TCO kosten van de verschillende aandrijfconcepten liggen zeer dicht bij elkaar (met uitzondering van het fossiele LNG). Kosten blijken te variëren tussen 1,0 miljoen en 1,1 miljoen Euro.



Figuur 2 Total Cost of Ownership transporteur [diesel en LNG o.b.v. prijzen fossiele brandstoffen, waterstof o.b.v. elektrolyse met elektriciteitsmix NL]

Aanbevelingen

In dit onderzoek zijn een groot aantal onzekerheden naar boven gekomen, die het nu onmogelijk maken om een voorkeursvariant aan te wijzen. Onzekerheden in kosten van energie, infrastructuur en voertuigen kunnen bovenstaande bevindingen sterk wijzigen. Specifiek zijn de volgende onzekerheden in kosten te benoemen:

Energiekosten

- Kosten en beschikbaarheid voor transport van LBG. Bij gebleken beschikbaarheid van LBG kan LNG/LBG nader in de vergelijking worden meegenomen;
- Kosten voor stationair laden. Momenteel is hier één literatuurbron voor gevonden en zijn de achterliggende aannames ten aanzien van de genoemde elektriciteitsprijs en de business case van stationair laden van vrachtwagens onbekend;
- Kosten voor dynamisch laden met ERS-OC. Deze zijn deels afhankelijk van het marktmodel en deels van de kosten van aanleg en beheer. Wat betreft dit laatste blijken de bevindingen van Movares te verschillen van andere studies. Aanbevolen wordt een gedetailleerde haalbaarheidsstudie uit te voeren t.a.v. aanleg, beheer, marktuitrol en marktmodel van ERS-OC. Specifiek hierbinnen zijn te benoemen:
 - o Hoewel ERS-OC momenteel het meest marktrijp oogt van de verschillende ERS-concepten, zijn er nog volop ontwikkelingen. Aanbevolen wordt om in samenwerking met Europese overheden (koplopers Zweden en Duitsland) meer inzicht te krijgen in de uitdagingen en het potentieel van ERS-concepten gebaseerd op rail en inductie;
 - o Aanlegkosten per kilometer bovenleiding. Movares komt tot hogere kosten voor de bovenleiding plus masten dan eerdere literatuurstudies. Nader onderzoek wordt aanbevolen naar de daadwerkelijke kosten in Zweedse en Duitse pilots, en de inschattingen van betrokkenen (overheden, leveranciers, kennisinstututen) naar de ontwikkeling van deze kosten;
 - o Voor de elektrische voeding van ERS-OC systemen bieden gesloten private netten kansen om kosten te reduceren. Nader onderzoek is hier vereist naar de technische, financiële en juridische aspecten hiervan in relatie tot de opschaalbaarheid van een ERS-OC systeem;
 - o Marktuitrol: meer inzicht is vereist ten aanzien van ERS ontwikkelingen in buurlanden. Tevens wordt geadviseerd om, gezien het internationale karakter van wegtransport, internationaal af te stemmen ten aanzien van marktintroductie strategieën;
 - o Vervoerders: voor de categorie trekkers met oplegger is meer inzicht vereist ten aanzien van aantallen (jaarvolume en piek), nationale en internationale bestemmingen, en perceptie van de doelgroep zelf. Dergelijke informatie staat aan de basis van een eventuele marktintroductie;
 - o Financiering. In deze studie is uitgegaan van financiële parameters passend bij een maatschappelijke voorziening zonder winstoogmerk. Afhankelijk van de mate en vorm van overheidsbetrokkenheid dient hier een nadere inschatting te worden gemaakt, en dient opnieuw de elektriciteitsprijs voor de transporteur te worden bepaald;
- Kostenontwikkeling waterstof uit elektrolyse. Ook hier is één literatuurbron voor gevonden, en zijn de achterliggende aannames ten aanzien van de business case van waterstof productie onbekend;

Voertuigkosten

- Batterijontwikkelingen: batterijkosten (aanschafkosten, levensduur en restwaarde) bepalen tot meer dan 15% de TCO kosten. Onderzoek naar de ontwikkelingen hiervan tot 2030 is vereist;
- Brandstofcel: energiekosten bepalen 45% van de TCO kosten van een brandstofcel voertuig. De ontwikkeling van de efficiëntie van de brandstofcel verdient nader onderzoek.

Inhoudsopgave

Gehanteerde afkortingen	3
Samenvatting	4
1 Inleiding	12
1.1 Achtergrond	12
1.2 Rijksbeleid	12
1.3 Doelstelling en onderzoeksvragen	13
1.4 Methodiek	14
1.5 Scope onderzoek	14
1.6 Leeswijzer	14
2 Opties verduurzaming zwaar wegtransport	15
2.1 Introductie alternatieven diesel	15
2.1.1. <i>Alternatieven: elektromotor</i>	15
2.1.2. <i>Alternatieven: verbrandingsmotor</i>	16
2.2 Electric Road Systems	16
2.2.1. <i>ERS-OC</i>	17
2.2.2. <i>ERS-rail</i>	17
2.2.3. <i>ERS-inductie</i>	17
2.2.4. <i>Voorkeursvariant</i>	18
2.3 Verbrandingsmotor	19
2.3.1. <i>Diesel</i>	19
2.3.2. <i>LNG</i>	19
2.4 Elektrische aandrijving	19
2.4.1. <i>BEV</i>	19
2.4.2. <i>O-BEV</i>	21
2.4.3. <i>O-HEV: diesel hybride</i>	21
2.4.4. <i>FCEV</i>	22
2.5 Klimaat en luchtkwaliteit	24
2.5.1. <i>CO₂-emissies</i>	24
2.5.2. <i>Luchtkwaliteit: stikstof, fijn stof</i>	25
2.6 Conclusies	25
3 Analyse hoofdwegennet	27
3.1 Methodiek	27
3.2 Ruimtelijke analyse	29
3.3 Temporele analyse	30
3.4 Toekomstscenario	32
3.5 Voertuiganalyse	32
3.6 Trajectkeuze	33
3.7 Discussie	34
4 Kosten ERS-OC infrastructuur	36
4.1 Beschrijving concept	36
4.1.1. <i>Conceptontwerp en verliezen</i>	37
4.2 Aanleg	38

4.2.1. <i>Conceptontwerp en opschaling</i>	40
4.3 Beheer	40
4.3.1. <i>Bovenleiding</i>	40
4.3.2. <i>Gelijkrichterstations</i>	42
4.3.3. <i>Kabels</i>	42
4.3.4. <i>Milieubelasting</i>	42
4.3.5. <i>Beschikbaarheid grondstoffen</i>	42
4.4 Voorbeeld: case A15	43
4.4.1. <i>Dimensionering infrastructuur</i>	43
4.4.2. <i>Spanning, stroom en verliezen</i>	43
4.4.3. <i>Voeding vanuit net</i>	44
4.5 Capex	45
4.6 OPEX	47
4.6.1. <i>Beheerkosten</i>	47
4.6.2. <i>Vervanging bovenleiding</i>	47
4.6.3. <i>Overig onderhoud</i>	47
4.6.4. <i>Periodieke kosten regionaal netbeheer</i>	47
4.7 Risico analyse	47
4.7.1. <i>Veiligheid</i>	48
4.7.2. <i>Aanvullend</i>	48
4.8 Conclusies	48
5 Kosten en baten	49
5.1 Voertuigen	49
5.1.1. <i>Onderhoud</i>	49
5.1.2. <i>Heffingen en belastingen</i>	50
5.2 Energie en brandstof	51
5.3 Infrastructuur	52
5.4 Kosten infrabeheerder	52
5.5 Kosten transporteur	53
5.6 Werkgelegenheid	54
5.7 Conclusies	54
6 Conclusies en aanbevelingen	56
6.1 Hoofdconclusie	56
6.2 Deelconclusie: milieu	56
6.3 Aandachtspunt: circulariteit	57
6.4 Deelconclusie: kosten en baten	57
6.5 Onzekerheden	57
6.6 Tot slot	58
Literatuurlijst	59
Bijlage Levenscyclus aspecten	61
Bijlage Tussenafstand gelijkrichterstations	63
Bijlage Trajectstudie A15	65
Colofon	70

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In het Klimaatakkoord van 2019 heeft Nederland zich gecommitteerd tot een CO₂-emissiereductie van 49% per 2030 ten opzichte van 1990. In de transportsector is de uitstoot sinds 1990 echter toegenomen. Het belang van duurzamer vrachtvervoer is dan ook groot. Momenteel worden als alternatieven voor fossiele diesel onder meer batterij elektrisch rijden en waterstof genoemd, met hernieuwbare vloeibare brandstoffen als transitie oplossing naar volledig nul-emissie vervoer.

De zogeheten Electric Road Systems kunnen deze opties ondersteunen. Binnen deze familie van technologieën is het mogelijk om voertuigen van elektriciteit te voorzien tijdens het rijden. Dit kan door middel van een bovenleiding, rail of via inductie. Op deze wijze kunnen voertuigen op geëlektrificeerde wegen efficiënt gebruik maken van elektrische aandrijving en eventuele batterijen kunnen worden opgeladen. Ook kunnen kostbare en zware batterijen kleiner worden uitgevoerd. Deze vorm van opladen wordt daarom ook wel dynamisch laden genoemd. Buiten dit netwerk kunnen zij hun weg vervolgen met in het voertuig opgeslagen energie: in een batterij, in waterstof, of in hernieuwbare of fossiele brandstoffen.

In onder meer Zweden, Duitsland en de Verenigde Staten¹ zijn inmiddels pilots gaande met Electric Road Systems. In Duitsland bijvoorbeeld wordt momenteel op de Autobahn ervaring opgedaan met bovenleidingsystemen in Hessen (ELISA, 2x5 km), Schleswig-Holstein (FESH, 2x5 km) en Baden-Württemberg (eWayBW, 2x4 km).

Binnen het Ministerie voor Infrastructuur en Waterstaat is begin 2020 de vraag gesteld in hoeverre Electric Road Systems vanuit milieu en economisch perspectief kunnen bijdragen aan het reduceren van CO₂-emissies en luchtvervuiling van zwaar wegtransport in Nederland.

1.2 Rijksbeleid

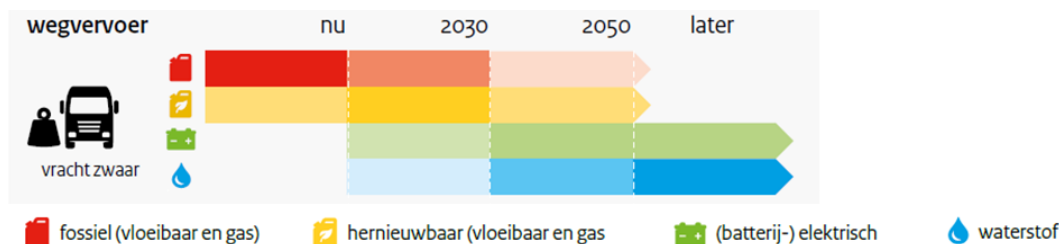
In de vorige paragraaf zijn reeds de landelijke klimaatdoelstellingen genoemd.

Ten aanzien van stadslogistiek is in de Green Deal Zero Emissie Stadslogistiek (ZES) afgesproken dat uiterlijk in 2025 in de 30-40 grotere steden in Nederland zero emissie zones ingevoerd worden voor stadslogistiek (MinI&W 2020).

Voor de verduurzaming van de logistiek is er tevens een doelstelling van 30% reductie van de CO₂-uitstoot door achterland en continentaal vervoer in 2030.

Verduurzaming van het zwaar wegtransport wordt momenteel voorzien middels elektrificatie, inzet van waterstof en gedurende een overgangsfase door inzet van hernieuwbare brandstoffen (MinI&W 2020). Specifiek worden daarin genoemd batterij elektrisch vervoer, groene waterstof, hernieuwbare brandstoffen (Power-to-X), synthetische brandstoffen en duurzame biobrandstoffen (vloeibaar en gasvormig). De ambitie is dat uiteindelijk alle mobiliteit nul-emissie wordt.

¹ www.electricroads.org/demonstrations/ [bezocht op 1/10/2020]



Figuur 1-1 Fasering energietransitie zwaar wegtransport (MinI&W 2020)

Beleid hiertoe is reeds in gang gezet of wordt momenteel verder vormgegeven. In de recente ‘Kabinetsvisie waterstof’ (MinEZ 2020) is de verwachting verwoord dat zwaar transport (weg, water en wellicht de luchtvaart) en de industrie de eerste belanghebbenden zullen zijn van een waterstofeconomie.

Een belangrijke aanjager voor de verduurzaming van de brandstofinfrastructuur is de Europese Alternative Fuels Infrastructure Directive (AFID), die voorschriften geeft voor de uitrol van tank- en laadinfrastructuur. De AFID wordt in 2021 herzien. Naast de AFID is er meer Europese regelgeving die nauw verbonden is met nationale regelgeving. Enkele hiervan zijn:

- Verordening CO₂-emissionenormen voor nieuwe zware bedrijfsvoertuigen. Deze herziene verordening bevat strengere CO₂-emissionenormen voor nieuwe zware bedrijfsvoertuigen (vrachtwagens, bussen en touringcars). Volgens de nieuwe regels dienen deze de CO₂-uitstoot vanaf 2025 met gemiddeld 15 % terug te dringen en vanaf 2030 met 30%, in vergelijking met de uitstoot in 2019.
- De Richtlijn Hernieuwbare Energie (Renewable Energy Directive, 2009) stelt een percentage van 20% van hernieuwbare energie in de Europese Unie verplicht per 2020, en 10% voor transport. Deze richtlijn wordt momenteel herzien (implementatie per 30 juni 2021). Voor transport geldt dan een doelstelling van minimaal 14% hernieuwbare energie in 2030.
- Richtlijn Schone en energie-efficiënte voertuigen (Clean Vehicle Directive). In mei 2019 is de herziene Europese Richtlijn schone en energie-efficiënte voertuigen (Clean Vehicle Directive) van kracht geworden. Doel van deze richtlijn is om het gebruik van schone, energie-efficiënte voertuigen door middel van publieke inkoop te bevorderen.

Binnen deze beleidskaders wordt nu door overheid en maatschappelijke partners gezocht naar de transitiepaden voor nul-emissie zwaar wegtransport. Onderdeel hiervan is de vraag in hoeverre Electric Road Systems hierbij een rol kunnen spelen.

1.3 Doelstelling en onderzoeksvragen

Om in beeld te brengen in hoeverre Electric Road Systems (ERS) kunnen bijdragen aan het reduceren van CO₂-emissies in zwaar wegtransport, is Movares opdracht gegeven de volgende vraag te beantwoorden:

Maak inzichtelijk in hoeverre ERS voor vrachtvervoer een haalbare mogelijkheid is om de beleidsdoelen van de Nederlandse overheid rondom CO₂ reductie en transitie naar meer duurzame wegtransportoplossingen te realiseren.

Hierbinnen zijn door het ministerie de volgende deelvragen benoemd:

1. Stel een milieu-impactvergelijking met relevante indicatoren (broeikasgassen, stikstof en fijnstof) op voor de toepassing van ERS in de Nederlandse situatie. Onderzoek hierbij ook hoe ERS samen kan gaan met andere technieken, zoals batterij elektrische voertuigen en brandstofcel elektrische voertuigen. Vergelijk deze bevindingen met de ontwikkeling van diesel en (bio-)LNG. Hierop wordt ingegaan in hoofdstuk twee;
2. Maak scenario's op basis waarvan kan worden bepaald voor welke delen van het Nederlandse hoofdwegennet ERS het meest zinvol/rendabel zou kunnen zijn. Hierop wordt ingegaan in hoofdstuk drie;
3. Stel een maatschappelijke kosten-batenanalyse (maatschappelijke businesscase) op voor de toepassing van ERS in de Nederlandse situatie, waar mogelijk met indicaties voor werkgelegenheid en inzet Nederlandse bedrijven. Hierop wordt ingegaan in hoofdstuk vijf;
4. Vergelijk de ERS-businesscase met de maatschappelijke kosten-baten van batterij elektrische voertuigen, brandstofcel elektrische voertuigen en diesel-hybride voertuigen. Deze vergelijking wordt gemaakt in hoofdstuk vijf.

1.4 Methodiek

Om aan deze vragen invulling te kunnen geven, is door Movares als eerste stap een literatuurstudie uitgevoerd, met onder meer aandacht voor Duitse studies als het StratON project. Vervolgens is op basis van de Nationale Databank Wegverkeersgegevens een analyse gemaakt van het hoofdwegennet, en zijn scenario's opgesteld voor de mogelijke uitrol van een ERS netwerk. Tevens is een berekening gemaakt van de kosten van een ERS bovenleiding netwerk in Nederland, met een uitwerking van een case voor de A15. Op basis van bovenstaande stappen is vervolgens een kosten-baten analyse opgesteld voor introductie van ERS in Nederland.

De vergelijking tussen de verschillende aandrijfconcepten is primair financieel op basis van Total Cost of Ownership. Daarnaast worden de opties vergeleken op basis van CO₂-emissies en luchtkwaliteit in 2030.

1.5 Scope onderzoek

Binnen dit onderzoek is de volgende scope gehanteerd:

- Als referentiejaar wordt 2030 gehanteerd;
- Hernieuwbare brandstoffen vallen buiten de scope van dit onderzoek;
- Marktintroductiescenario's vallen buiten de scope van dit onderzoek;

1.6 Leeswijzer

In dit rapport is de volgende opbouw gevolgd. Na deze introductie wordt in hoofdstuk twee een beschrijving gegeven van de beschouwde aandrijfconcepten inclusief energie efficiëntie, voertuigkosten en emissies. In hoofdstuk drie wordt een analyse van het hoofdwegennet gepresenteerd, evenals een selectie van hoofdwegen geschikt voor elektrificatie middels een bovenleiding. Een uitwerking van de kosten van bovenleidingsystemen langs hoofdwegen staat in hoofdstuk vier, evenals een uitwerking voor de A15. In hoofdstuk vijf worden deze kosten gecombineerd tot een kosten-baten analyse. In hoofdstuk zes worden de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek gepresenteerd.

2 Opties verduurzaming zwaar wegtransport

In dit hoofdstuk worden de beschouwde aandrijfconcepten beschreven, inclusief energie efficiëntie, kosten en emissies. Met behulp van bevindingen uit dit hoofdstuk worden vervolgens in hoofdstuk vijf de gebruikerskosten berekend. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat de betreffende vrachtwagens per jaar 120.000 km rijden (Mottschall 2020, CE Delft 2018).

Technische uitgangspunten vrachtwagen (Movares)

Er zijn verschillende vormen van zwaar wegvervoer. Een veelvoorkomende vrachtwagen voor dit type transport (70% in Nederland) is een combinatie van een trekker (incl. slaapcabine) met oplegger (categorie N3, >12 ton). Deze wordt met name ingezet voor internationaal transport en rijdt afstanden in de range van 400-500 km/dag.



In deze studie ligt de focus op deze trekker met oplegger combinatie. Een nadere analyse van andere vrachtwagentypes waarvoor ERS mogelijk interessant is, is nog een aanbeveling voor vervolgonderzoek.

Jaarlijks aantal kilometers	[km/j]	120.000
Aantal dagen per jaar rijdende	[dag/jr]	260
Aantal kilometers per dag	[km/dag]	460
Gewicht vrachtwagen (voor dit rapport)	[ton]	29
Gross Combination Weight categorie (GCW)	[ton]	>16t
- Gewicht Baseline	[ton]	15
- Gewicht Goederen typical payload	[ton]	14
Ascombinatie	[# assen]	4x2
Afstand tussen assen (categorie)	[meter]	>12,2
Levensduur voertuig	[jaar]	10
Tractor-trailer ratio		1
Emissions Certification		Euro VI

2.1 Introductie alternatieven diesel

Om een significante reductie van de CO₂-uitstoot in het wegtransport te realiseren, is er vooralsnog niet één duidelijk alternatief voor diesel aangedreven transport (MinI&W 2020). Zowel aandrijfconcepten met een elektromotor als met een verbrandingsmotor hebben potentieel, en kunnen elkaar soms versterken. In deze paragraaf wordt een korte introductie gegeven in de binnen deze studie beschouwde aandrijfconcepten.

2.1.1. Alternatieven: elektromotor

Elektrische aandrijfconcepten zijn al geruime tijd aan een opmars bezig. Voordelen van deze concepten vergeleken met verbrandingsmotoren zijn een hogere efficiëntie, minder onderhoud (minder bewegende delen) en geen voertuigemissies. In het personenvervoer waren er in Nederland in augustus 2020 ruim 130.000 batterij elektrische personenauto's, bijna 300 brandstofcel elektrische personenauto's en ruim 100.000 plugin hybrides (RVO 2020).

Ook voor de verduurzaming van het zwaardere vrachtvervoer wordt naar de elektromotor gekeken. De elektriciteit voor deze elektromotor kan worden opgeslagen in batterij, al dan niet in combinatie met een brandstofcel. Batterijen kunnen bovendien

stationair worden opgeladen op laadpunten of tijdens het rijden middels Electric Road Systems (ERS). Ook combinaties met een verbrandingsmotor (hybride voertuigen) zijn mogelijk. Binnen deze studie wordt nader ingegaan op de volgende opties:

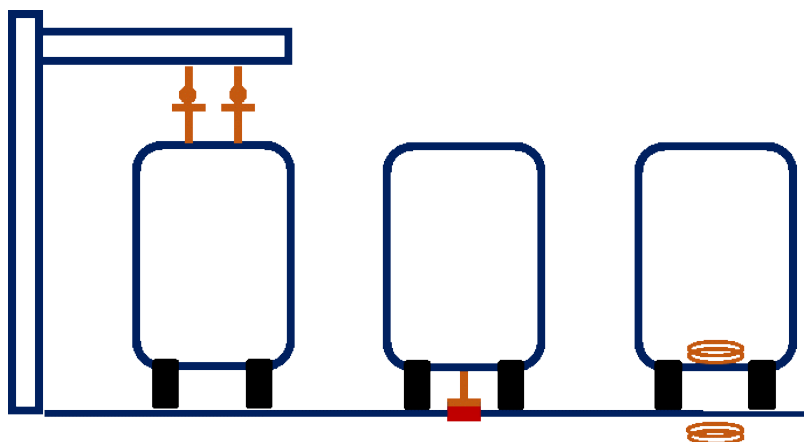
- BEV 400, batterij elektrische voertuigen met een actieradius van 400 km. Met deze actieradius kan worden voorzien in ruim 30% van de ritten van regionaal transport uitgaande van alleen 's nachts laden. Indien ook overdag wordt geladen kan in ruim 90% van de regionale ritten worden voorzien (± 250 km/dag, EVConsult 2019);
- BEV 800, batterij elektrische voertuigen met een actieradius van 800 km (landelijk transport). Met deze actieradius kan worden voorzien in ruim 60% van de ritten van landelijk transport uitgaande van alleen 's nachts laden. Indien ook overdag wordt geladen kan in ruim 90% van de landelijke ritten worden voorzien (± 500 km/dag, EVConsult 2019);
- FCEV, brandstofcel elektrische voertuigen, actieradius 800 km;
- O-BEV 100, batterij elektrische voertuigen geschikt voor dynamisch laden met behulp van een bovenleiding (Overhead Catenary), en 100 km actieradius batterij elektrisch;
- O-BEV 250, batterij elektrische voertuigen geschikt voor dynamisch laden met behulp van een bovenleiding (Overhead Catenary), en 250 km actieradius batterij elektrisch;
- O-HEV: diesel-hybride elektrische voertuigen, geschikt voor laden middels een bovenleiding.

2.1.2. *Alternatieven: verbrandingsmotor*

Het huidige dominante aandrijfconcept in zwaar wegtransport is de dieselmotor. Naast de diesel motor, en de hierboven beschreven hybride variant, wordt in deze studie nader ingegaan op voertuigen met als brandstof LNG (liquefied natural gas). Deze technologie heeft vergroeningspotentieel wanneer wordt ingezet op LBG (liquefied biogas). Buiten de scope van dit onderzoek vallen vloeibare biobrandstoffen (o.a. biodiesel). Ook de mate van beschikbaarheid van bio-methaan voor LBG valt buiten dit onderzoek.

2.2 *Electric Road Systems*

De term Electric Road Systems (ERS) verwijst naar technologieën die een voertuig in staat stellen elektrisch te laden terwijl er wordt gereden (Gustavsson 2019). Dit kan worden gerealiseerd via een bovenleiding (OC, Overhead Catenary), een rail in de weg of contactloos middels inductie.



Figuur 2-1 ERS systemen: bovenleiding (OC), rail en inductie

2.2.1. *ERS-OC*

‘Overhead Catenary’ of bovenleidingsystemen maken gebruik van geleidende kabels om voertuigen van elektriciteit te voorzien. De voertuigen beschikken over een beweegbare pantograaf om wanneer gewenst het voertuig op te kunnen laden. Het concept maakt voor de bovenleiding gebruik van technologie zoals gebruikt rond het spoor, light rail en bij sommige bussen. ERS-OC lijkt van de ERS systemen het meest marktvolwassen, met projecten op de openbare weg in onder meer Duitsland en Zweden².

2.2.2. *ERS-rail*

ERS railsystemen voorzien voertuigen van elektriciteit d.m.v. een rail in het wegdek. Het concept is bekend uit sommige tram toepassingen, waarin een derde rail in de weg is aangebracht ten behoeve van de elektriciteitsvoorziening. Het systeem wordt op de openbare weg toegepast in onder meer Zweden.

2.2.3. *ERS-inductie*

Een derde mogelijkheid betreft inductief laden. Middels inductielussen in het wegdek kan met dit concept draadloos elektriciteit worden overgebracht naar een rijdend voertuig. Aandachtspunten bevinden zich onder meer in veiligheidsrisico's en de efficiëntie van de overdracht. Van de drie ERS-concepten bevinden de inductieve systemen zich iets meer in de onderzoeksfase.



Figuur 2-2 ERS systemen: bovenleiding (OC), rail en inductie

² www.electricroads.org/demonstrations/ [bezocht op 1/10/2020]

2.2.4. Voorkeursvariant

De drie beschreven ERS systemen bevinden zich in verschillende fasen van hun ontwikkeling. Om tot een vergelijking te komen is op basis van literatuurbronnen (o.a. Hacker 2020, Gustavsson 2019, Lindgren 2018) en een interview³ onderstaande tabel opgesteld.

Tabel 2-1 Vergelijking ERS systemen

Vergelijking	ERS – OC	ERS – rail	ERS – inductie
TRL⁴ (Market readiness) voor zwaar vrachtvervoer	7-9	5-6	4-6
Technologie te gebruiken voor andere voertuigen	- Niet toepasbaar voor alle voertuigen	+ Bruikbaar voor verschillende soorten voertuigen	- Niet toepasbaar voor alle voertuigen
Beheer & Onderhoud	+ Geen impact op wegdek + Niet afhankelijk van huidige kwaliteit van wegdek - Slijtage bovenleiding	- Onderhoud a.g.v. vuil, sneeuw, ijs - Slijtage rail	- Ingrijpende impact op wegdek + Geen bewegende delen
Ruimtegebruik & ruimtelijke kwaliteit	- Gebruik van ruimte langs/boven de weg - Grote apparaten op voertuig - Negatieve visuele beleving	- Zichtbare rail in wegdek	+ Niet zichtbaar - Creëert magnetisch veld

Naast bovenstaande aspecten is de marktvolwassenheid een belangrijk aspect om in een eventuele systeemkeuze mee te nemen. Op basis van met name de pilots in Duitsland (EHighway, FESH, Elisa) kan worden verdedigd dat ERS-OC het systeem is met het hoogste ‘Technology Readiness Level’.

De bovenleidingsystemen hebben momenteel de hoogste (relatieve) marktvolwassenheid, maar rail en inductieve systemen blijven mogelijke ERS-alternatieven. Een gerealiseerd elektriciteitsnet langs de snelweg is voor al deze concepten bruikbaar.

³ Martin Gustavsson, 13/10/2020

⁴ Technology Readiness Levels geven de mate van ontwikkeling van een technologie aan, waarbij TRL 1 staat voor technologie aan het begin van de ontwikkeling en TRL 9 voor technologie die technisch en commercieel gereed is.

- 2.3 **Verbrandingsmotor** In deze paragraaf worden voertuigspecificaties als energie efficiëntie en voertuigkosten behandeld van voertuigen aangedreven door diesel en LNG, evenals de verwachtingen hierover voor 2030.
- 2.3.1. **Diesel** Door de grootschalige inzet van diesel in zwaar wegverkeer en efficiënte productiemethoden zijn de diesel voertuigkosten relatief gunstig vergeleken met alternatieven. Ook is er een wijdverspreid net van tankstations en serviceverleners ter ondersteuning.
- Dieselmotoren kennen een energie efficiëntie van 38% tot 46% (afhankelijk van beladingsgraad en type transport: lange afstand of regionaal), resulterend in een brandstofgebruik van 33,1 L/100 km (Delgado 2017). Verwachtingen zijn dat deze rond 2030 kan dalen tot 24,0 L/100 km (2,38 kWh/km, Kuhnel 2018) voor een trekker met oplegger.
- Naast het brandstofgebruik maken diesel voertuigen ook gebruik van AdBlue om de uitstoot van NOx te beperken en zo schoner te rijden.
- Voor de kosten van een typische vrachtwagen trekker in 2030 wordt uitgegaan van een prijs van € 119.000,- (Kuhnel 2018). Hierin zijn kosten meegenomen die de komende tien jaar worden verwacht om deze voertuigen energiezuiniger te maken.
- 2.3.2. **LNG** LNG vrachtwagens dragen hun brandstof met een temperatuur van -161 °C met zich mee in cilinders. Voertuigen kunnen zijn uitgerust met een dieselmotor of een Ottomotor ('benzinemotor'). In Nederland zijn momenteel ongeveer 150 tankstations⁵ waar LNG getankt kan worden. In deze studie is uitgegaan van voertuigen met een diesel motor (HPDI, High Pressure Direct Injection) en een actieradius van 800 km. Conform Kuhnel (2018) wordt er vanuit gegaan dat LNG voertuigen in 2030 dezelfde energetische efficiëntie hebben als diesel voertuigen (2,38 kWh/km). Momenteel ligt deze efficiëntie voor HDPI voertuigen nog 4% lager (Mottschall 2020).
- Voor de prijs van een LNG trekker wordt momenteel een meerprijs gevraagd ten opzichte van diesel van ongeveer € 45.000 (Mottschall 2020). Er wordt hier vanuit gegaan dat deze meerprijs in 2030 gedaald is tot 10% is ten opzichte van het diesel model (Kuhnel 2018).
- 2.4 **Elektrische aandrijving** Een van de interessante kenmerken van de elektrische aandrijflijn is de hoge efficiëntie (87%, SRF 2020). Ook heeft een elektromotor minder bewegende delen (minder onderhoud). In deze paragraaf wordt ingegaan op voertuigen met een batterij die stationair laden (BEV), batterij voertuigen die laden middels een bovenleiding (OC-BEV), brandstofcel elektrische voertuigen (FCEV) en een bovenleiding-diesel hybride variant (O-HEV).
- 2.4.1. **BEV** Batterij elektrische voertuigen dienen elektriciteit te laden bij een laadpunt. Dit kan in het zwaar wegtransport een planningsuitdaging opleveren, aangezien er veel energie moet worden geladen. De huidige laadstandaard voor snelladers gaat uit van 350 kW (NKL 2020) en een organisatie als CharIN ondersteunt momenteel de ontwikkeling van standaarden rond megachargers (>1 MW). Nader onderzoek moet duidelijk maken wat een dergelijk oplaadvermogen met de levensduur van een batterij doet.

⁵ info.iveco.nl/blog/vrachtervoer-lng-transport-heavy [bezoekt op 1/10/2020]

De omvang van een batterij kan worden gebaseerd op de af te leggen afstand, de energievraag per km, batterij degradatie (20%) en een minimaal energieniveau (State of Charge) van 10% (EVConsult 2020). Bij een energievraag van 1,3 kWh/km voorziet een batterij van 700 kWh in een actieradius van ruim 400 km. Bij een levensduur van 1250 cycli (Kuhnel 2018) kan deze batterij voorzien in energie gedurende 500.000 km, waarna deze dient te worden vervangen. Dergelijke batterijen hebben rond 2030 naar verwachting een gewicht van bijna 3 ton (EVConsult 2020).

Verwachtingen ten aanzien van de levensduur van batterijen zijn hooggespannen. Recente publicaties (CE Delft 2020) noemen voor 2030 een aantal volcycli van 5.000. De achterliggende bronnen (Hoekstra 2019, Few 2018) blijken echter gebaseerd te zijn op expert interviews uit 2015-2016. Ons inziens is hier nader onderzoek vereist. Binnen deze studie wordt voor de levensduur van de batterij een conservatiever aantal volcycli van 1.250 aangehouden (Kuhnel 2018).

Welke verwachtingen zijn er t.a.v. de energie efficiëntie van een elektrisch voertuig? Bij opslag van elektriciteit in een batterij is sprake van enige verliezen (10%, Kuhnel 2018), dus de levering vanaf het elektriciteitsnet is iets hoger dan de energie die de elektromotor zelf vraagt. Wel worden de komende jaren nog efficiëntieverbeteringen voorzien, met name lucht- en rolweerstand. Verbeteringen in efficiëntie van de aandrijflijn en batterij zijn beperkt (Kuhnel 2018). In het geval van voertuigen met een pantograaf is er overigens sprake van extra luchtweerstand, en weerstandsverliezen binnen het bovenleidingsysteem ($\pm 10\%$ afhankelijk van ontwerp, zie hoofdstuk 4).

Onderstaande tabel geeft een verwachting weer van het energiegebruik van elektrisch rijden in zwaar wegtransport (Kuhnel 2018). Hierin is onder meer te lezen hoe richting 2030 de voertuigen steeds efficiënter worden. Ook zijn de batterijverliezen zichtbaar (verschil tussen levering van batterij aan aandrijving en levering aan het voertuig). Tevens valt te lezen dat door de iets hogere luchtweerstand een ERS-OC voertuig iets minder efficiënt rijdt. Tot slot is cursief weergegeven welke energie het ERS-OC systeem per voertuig dient aan te leveren inclusief bovenleiding verliezen. Deze verliezen komen overigens voor rekening van de bovenleiding exploitant.

Tabel 2-2 Elektriciteitsvraag zwaar wegtransport

Jaar	Eenheid	Batterij elektrisch		ERS-OC	
		Battery-to-wheel	Levering aan voertuig	Levering aan voertuig	Levering aan bovenleiding
2025	[kWh/km]	1,36	1,49	1,45	1,59
2030	[kWh/km]	1,29	1,42	1,38	1,51

De ontwikkeling van batterijen wordt sterk gedreven door de markt van personenvoertuigen. Belangrijke parameters hierbij zijn de aanschafkosten van een batterij (€/kWh), het gewicht (energiedichtheid in Wh/kg) en de levensduur (aantal cycli). Een batterijpakket voor een vrachtwagen is overigens duurder dan een batterijpakket voor een personenvoertuig (hogere vermogens, extra koeling, etc). Voor de kosten van een batterijpakket voor een vrachtwagen rond 2030 wordt een prijs aangehouden van 140 €/kWh tot 200 kWh en 120 €/kWh daarboven (Kuhnel 2018).

De volgende tabel geeft de component kosten en prijs weer voor batterijen van verschillende grootte. Hierbij is uitgegaan van 280 Wh/kg in 2030 (EVConsult 2020):

Tabel 2-3 Omvang en kosten beschouwde batterijen in 2030

Voertuig	Actieradius	Efficiëntie	Batterij capaciteit	Gewicht	Prijs
	[km]	[kWh/km]	[kWh]	[kg]	[Euro]
O-BEV 100	100	1,38	180	650	€ 26.000
O-BEV 250	250	1,38	450	1.650	€ 55.000
BEV 400	400	1,29	700	2.450	€ 83.000
BEV 800	800	1,29	1.400	4.900	€165.000

2.4.2. O-BEV

Een alternatief voor stationair laden is laden op de snelweg met twee bovenleidingen. Voordeel hiervan is dat de relatief dure batterij kleiner gedimensioneerd kan worden en de actieradius van een voertuig toch kan worden uitgebreid. Wel vraagt dit om hoge investeringen in de bovenleidinginfrastructuur. Ook hebben de voertuigen een hogere luchtweerstand (zie vorige paragraaf).

Bij een batterijomvang van 180 kWh is het voertuig in staat om zich 100 km buiten de bovenleiding te bewegen (O-BEV 100). Een batterij van 450 kWh resulteert in een actieradius buiten de bovenleiding van 250 km (O-BEV 250).

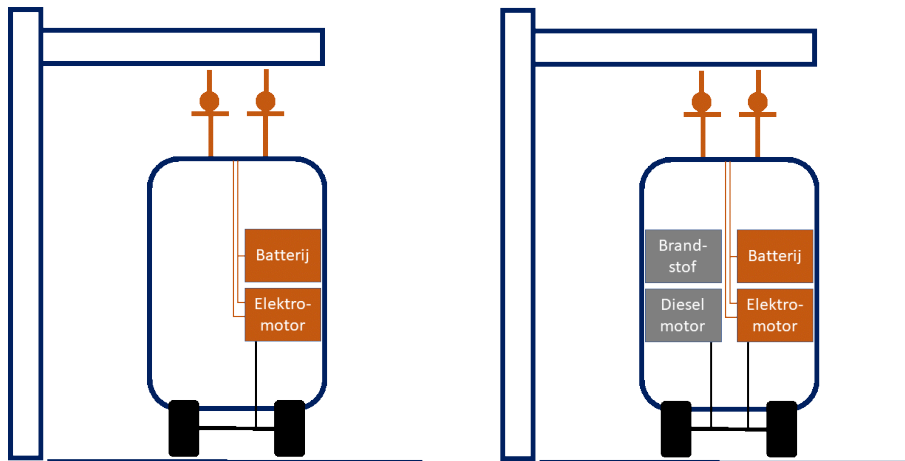
Typische componenten voor een O-BEV voertuig zijn de pantograaf, batterij, elektromotor en overige componenten van de aandrijflijn. De volgende tabel geeft een overzicht van deze kosten voor een O-BEV 100.

Tabel 2-4 Kosten O-BEV componenten in 2030

Component	Omvang	Kosten	Bron
Pantograaf	---	€ 19.000	Kuhnel 2018
Elektromotor	350 kW	€ 5.000	Moultak 2017
Batterij (O-BEV 100)	180 kWh	€ 26.000	EVConsult 2020
Aandrijflijn (ex motor)	---	€ 14.000	Kuhnel 2018
Totaal		€ 64.000	

2.4.3. O-HEV: diesel hybride

In deze studie wordt voor de OC-diesel hybride variant uitgegaan van een parallelle volwaardige diesel aandrijving (350 kW) naast de elektrische aandrijflijn (i.t.t. een seriële 'range extender' configuratie). De voertuigen beschikken over een zeer kleine batterij (2 kWh). Deze hybridisering resulteert in een groter bereik buiten het bovenleidingnet, en levert tevens een efficiënter gebruik op wanneer het voertuig in diesel modus rijdt: tot 2,50 kWh/km in 2025 en 2,21 kWh/km in 2030 (Kuhnel 2018). Bij een 50:50 verhouding elektrisch-diesel resulteert dit in een gemiddelde efficiëntie van 1,52 kWh/km.



Figuur 2-3 Schematische weergave van een O-BEV (links) en een O-HEV (rechts)

Naast een pantograaf (€ 19.000 in 2030) wordt in deze diesel hybride een elektromotor geplaatst, een kleine batterij (2 kW) en een hybride systeem. De kosten van deze laatste in 2030 worden geraamd op € 14.000 (Kuhnel 2018). Een elektromotor met 350 kW vermogen wordt dan geraamd op € 5.000 (Moultak 2017) en de batterij wordt in 2030 geraamd op € 800. Inclusief pantograaf komen de kosten van deze OC-hybridisering hiermee uit op ruim € 38.000 in 2030: 1/3 van de kosten van een diesel voertuig.

2.4.4. FCEV

Een ander alternatief betreft het gebruik van brandstofcellen. Een aantal nieuwe brandstofcel elektrische trucks zijn dit jaar aangekondigd of verschenen (Daimler Trucks, Hyundai, Renault) en deze ontwikkeling sluit goed aan bij de toenemende aandacht voor waterstof in onze energievoorziening (MinEZ 2020).

Brandstofcel elektrische voertuigen zijn in meerdere configuraties denkbaar. In deze studie wordt uitgegaan van een hybride systeem waarin een PEM (Proton Exchange Membrane) brandstofcel van 180 kW wordt ingezet gedurende de lange afstanden op de snelweg, en waarbij een batterij van 70 kWh wordt geactiveerd zodra er een hogere vermogensvraag is (start/stop/versnellen, hoogteverschillen, stedelijk verkeer, etc.). Op deze wijze wordt toch de gangbare 350 kW aandrijfvermogen gerealiseerd. Voor waterstof opslag wordt uitgegaan van opslag van 55 kg waterstof bij 700 bar (Adolf 2017).

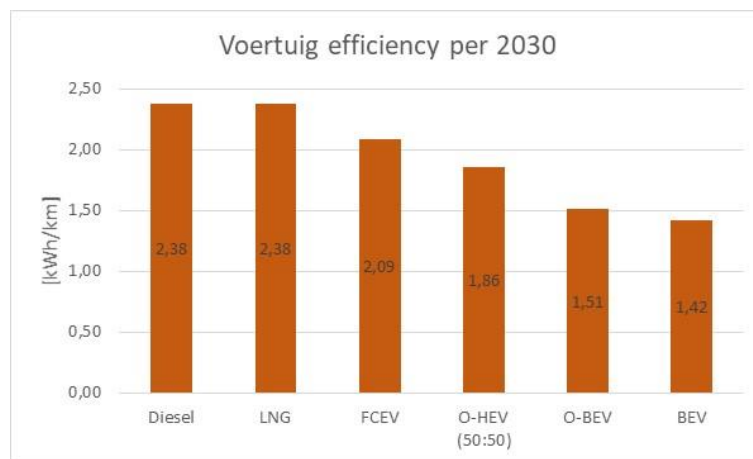
T.a.v efficiëntie van de brandstofcel wordt een gemiddelde van 52% aangehouden in 2025 en 54% in 2030. Weliswaar worden soms hogere efficiencies voor de brandstofcel genoemd (Adolf 2017, Meszler 2018), maar deze worden behaald bij een beperkte belading.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de energievraag van brandstofcel elektrische voertuigen in vergelijking met zware transportvoertuigen met andere brandstoffen (Kuhnel 2018).

Tabel 2-5 Energievraag (brandstof) zwaar wegtransport

Jaar	Eenheid	Diesel	O-HEV	LNG	FCEV
2025	[kWh/km]	2,68 (27,0 L/100 km)	2,50	2,68	2,30
2030	[kWh/km]	2,38 (24,0 L/100 km)	2,21	2,38	2,09

De informatie uit tabel 2-2 en uit tabel 2-5 zijn gecombineerd en in onderstaande figuur grafisch weergegeven. Hierbij is er vanuit gegaan dat het O-HEV voertuig 50% van de afstand in diesel modus rijdt. Zichtbaar in het figuur is onder meer de hogere energie efficiëntie van de elektrisch aangedreven voertuigen.

**Figuur 2-4 Energievraag van de diverse aandrijfconcepten in kWh/km**

De kosten van een brandstofcel elektrisch voertuig zijn gebaseerd op de basisprijs van een dieselveertuig zonder conventionele aandrijflijn en met de bijbehorende kosten van een brandstofcelsysteem: elektromotor, batterij, brandstofcel en ondersteunende systemen (koeling, compressor), waterstof tanksysteem en het hybride systeem. Deze kosten staan weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 2-6 Kosten brandstofcel aandrijving in 2030

Component	Kosten
Elektromotor (350 kW)	€ 4.900
Brandstofcel (180 kW) + ondersteunend systeem	€ 21.000
Tanksysteem	€ 31.000
Batterij (75 kW)	€ 8.400
Hybride systeem	€ 14.000
Brandstofcelaandrijving totaal	€ 80.000

Bovenstaande kosten zijn overigens vrij onzeker, gezien het prille stadium waar de technologie zich in bevindt. Een belangrijke aanname is dat een brandstofcel in 2030 € 115/kW kost (Moultak 2017, uitgaande van een marktomvang van 10.000 stuks per jaar).

2.5 Klimaat en luchtkwaliteit

Van alternatieven voor diesel wordt verwacht dat zij substantieel zullen bijdragen aan het terugdringen van de uitstoot van broeikasgassen. In deze paragraaf wordt nader ingegaan op de voertuig CO₂-emissies die gepaard gaan met de verschillende alternatieven, evenals de impact op de lokale luchtkwaliteit. Let wel: hierin zijn de emissies die gepaard gaan met het realiseren van de (laad- en tank) infrastructuur niet meegenomen.

2.5.1. CO₂-emissies

Bij het bepalen van de CO₂ uitstoot wordt een onderscheid gemaakt tussen de directe emissies van het voertuig zelf, de zogenaamde ‘Tank-To-Wheel’ emissies (TTW), en de emissies die eerder in de keten werden veroorzaakt: ‘Well To Tank’ (WTT). Samen vormen deze emissies de totale energieregerelateerde uitstoot, oftewel de ‘Well-To-Wheel’ uitstoot (WTW).

In de beschouwde aandrijftechnologieën is er alleen sprake van TTW emissies bij inzet van diesel en LNG. Een elektromotor stoot immers geen CO₂ uit. Voor diesel met 5% biodiesel is deze uitstoot gelijk aan 256 g CO₂/kWh (2,54 kg per liter) en voor LNG bedraagt deze 215 g CO₂/kWh.

Voor de CO₂ uitstoot van Nederlandse elektriciteit wordt uitgegaan van de Klimaat- en energieverkenning 2019 (integrale methode) (PBL 2019). Niet meegenomen is de mogelijkheid om groene stroom in te zetten, al dan niet met certificaten.

In onderstaande tabel staat de CO₂ uitstoot per opgewekte kWh elektriciteit. Zichtbaar is hoe als gevolg van de verduurzaming van de elektriciteitsopwekking de gemiddelde uitstoot per kWh daalt.

Tabel 2-7 CO₂-emissiefactor elektriciteit (integrale methode) (KEV2019)

Jaar	2005	2015	2020	2025	2030
CO ₂ -emissiefactor [g CO ₂ /kWh]	510	530	300	210	90

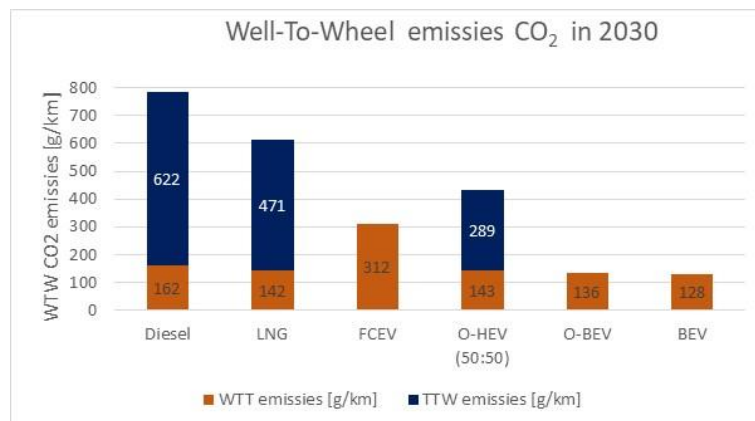
Naast bovenstaande emissiefactoren is in deze studie uitgegaan van CO₂-emissiefactoren van www.co2emissiefactoren.nl en van het Europese Joint Research Centre (JRC 2020). Deze emissiefactoren staan weergegeven in de volgende tabel.

Tabel 2-8 CO₂-emissiefactoren van beschouwde aandrijfconcepten in 2030

	Energie efficiëntie	WTW emissies	TTW emissies	WTT emissies
	[kWh/km]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
Diesel	2,38	329	261	68
LNG	2,38	258	198	60
FCEV	2,09	149	0	149
O-HEV diesel modus	2,21	329	261	68
O-HEV OC modus	1,51	90	0	90
O-HEV 50:50	1,86	210	131	79
O-BEV	1,51	90	0	90
BEV	1,42	90	0	90

Onderstaande figuur geeft de CO₂-emissies weer van de beschouwde aandrijfconcepten. Hierbij zijn bij LNG de broeikasgasemissies door ontsnappend methaan

niet meegenomen. Tevens is voor O-HEV uitgegaan van 50% transport in dieselmodus. Dit percentages zal overigens sterk afhangen van de dekking van het beoogde bovenleidingnet.



Figuur 2-5 CO₂emissies van verschillende aandrijfconcepten

2.5.2. *Luchtkwaliteit: stikstof, fijn stof*

Voor dieselveertuigen en LNG voertuigen geldt de Euro 6 norm voor emissies als stikstofoxiden, fijnstof en koolmonoxiden. Ook diesel-hybride voertuigen dienen aan deze norm te voldoen.

Voertuigen met een elektromotor (BEV, O-BEV, FCEV) kennen geen uitstoot vanuit de aandrijving zelf. Wel is er bij voertuigen met een pantograaf sprake van extra koper slijpsel als gevolg van het contact tussen pantograaf en bovenleiding.

Tenslotte is er bij alle voertuigen sprake van fijnstof productie als gevolg van bandenslijtage. Het is niet ondenkbaar dat bij voertuigen met zeer zware batterijen (BEV 800) sprake is van verhoogde bandenslijtage, en dus van verhoogde fijnstof productie. Momenteel vindt hiernaar onderzoek plaats. Voor nu wordt aangenomen dat deze mogelijke extra fijnstof productie verwaarloosbaar is.

2.6 *Conclusies*

In dit hoofdstuk is een beschrijving gegeven van de beschouwde aandrijfconcepten, inclusief energie efficiëntie, kosten en emissies.

De laatste tien jaar is wereldwijd ervaring opgedaan met meerdere Electric Road Systemen. Van de varianten met bovenleiding, rail voeding en inductie voeding lijkt de bovenleiding variant het meest ver in haar ontwikkeling. Het systeem is echter niet bruikbaar voor personenvoertuigen. Gezien de relatieve marktvolwassenheid van dit systeem wordt in deze studie binnen de verschillende ERS varianten verder alleen aandacht besteed aan het bovenleidingsysteem (ERS-OC).

De belangrijkste conclusies per aandrijfconcept zijn:

- Diesel is momenteel de standaard in zwaar wegtransport. Voor het komend decennium wordt voorzien dat brandstofgebruik van deze voertuigen 20% efficiënter wordt.
- LNG voertuigen zullen de komende jaren een vergelijkbare efficiëntie als diesel voertuigen behalen. Het is echter onduidelijk of kortcyclisch (bio/syn) methaan beschikbaar komt als groen alternatief voor deze fossiele brandstof om zo de emissievoordelen te behalen die nodig zijn om aan de reductie-doelstellingen te voldoen.

- BEV: Batterij Elektrische Voertuigen dienen één tot enkele keren per etmaal geladen te worden. Het laden van een actieradius van 800 km met snelladers kan momenteel plaatsvinden in 3,5 uur (350 kW), en binnen enkele jaren mogelijk in iets meer dan een half uur (megachargers). Een batterij van 1.400 kWh heeft in 2030 naar verwachting een gewicht van 5 ton.
- OC-BEV: voertuigen met een pantograaf kunnen worden uitgerust met een kleinere batterij (in deze studie: actieradius 100 km of 250 km) en op trajecten met een bovenleiding daarmee hun energievraag invullen. De extra luchtweerstand die deze pantograaf creëert leidt tot een iets lagere efficiëntie.
- O-HEV: hier wordt uitgegaan van een volwaardige elektrische aandrijflijn (350 kW) die parallel geplaatst wordt naast een diesel aandrijflijn. Deze hybridisering leidt tot een klein efficiëntie voordeel in diesel modus t.o.v. een traditioneel diesel voertuig. Er wordt hier uitgegaan van een 50:50 verdeling diesel : elektrische aandrijving.
- FCEV: deze voertuigen zijn hier voorzien van een 180 kW brandstofcel en een 70 kWh batterij die tijdelijk hogere vermogens van de elektromotor mogelijk maakt. Voor de brandstofcel wordt voor 2030 een gemiddelde efficiëntie van 52% voorzien.

Om de uitstoot van broeikasgas emissies te bepalen is gebruik gemaakt van de voertuig efficiëntie, bekende brandstofeigenschappen en de voorziene reductie van de CO₂-emissiefactor van elektriciteit in Nederland. Resultaten voor 2030 lopen uiteen van ruim 700 g CO₂/km voor diesel tot ruim 100 g CO₂/km voor BEV en O-BEV. Met de verdere verduurzaming van elektriciteit in Nederland zal deze uitstoot in de verdere toekomst nog lager worden.

3 Analyse hoofdwegennet

Om beter zicht te krijgen op welke delen van het Nederlandse hoofdwegennet ERS de meeste potentie heeft, en dus kansrijk is, is een verkennende analyse naar zwaar transport op het Nederlandse hoofdwegennet uitgevoerd. Ten behoeve van deze verkenning zijn de volgende onderzoeksvragen opgesteld:

- Wat is de ruimtelijke spreiding van zwaar vrachtverkeer⁶ op het Nederlandse hoofdwegennet?
- Hoeveel variatie in intensiteit van zwaar vrachtverkeer is er door het jaar heen op het Nederlandse hoofdwegennet?
- Hoeveel variatie in intensiteit van zwaar vrachtverkeer is er gedurende een etmaal?
- Wat is de voorspelling voor de intensiteit van zwaar vrachtverkeer in Nederland voor 2030 ten opzichte van de huidige situatie?
- Hoeveel trekkers met oplegger rijden op het hoofdwegennet en hoeveel trekkers met oplegger passeren er tijdens het drukste uur op een strekkende kilometer?
- Welke trajecten zijn potentieel het meest geschikt voor Electric Road Systems?

In paragraaf 3.2 wordt de methodiek, inclusief beschikbare databronnen, uiteengezet. Paragraaf 3.3 behandelt vervolgens de ruimtelijke analyses, gevolgd door de temporele analyses (paragraaf 3.4). Paragraaf 3.5 gaat vervolgens in op de combinatie trekker met oplegger en geeft inzicht in de verwachte groei tot 2030. Daarna volgen de conclusies en enkele aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

3.1 Methodiek

Om de onderzoeksvragen te beantwoorden, zijn zowel kwantitatieve als kwalitatieve analysetechnieken gebruikt. De kwantitatieve analyse om tot (ruimtelijke en temporele) intensiteiten te komen voor zwaar transport worden gedaan via GIS-analyse, statistische technieken en tijdreeksanalyse. De kwalitatieve analyse om te komen tot geschikte trajecten zijn uitgevoerd middels een (beknopt) literatuuronderzoek, aangevuld met (bewerkingen op) de verkregen informatie uit de kwantitatieve analyse en ervaringen van internationale transportknooppunten voor vrachtverkeer om hier een eerste verkenning voor te kunnen uitvoeren.

Data

Het verkeer op het Nederlandse hoofdwegennet wordt uitgebreid gemonitord middels verkeerslussen, fcd (floating car data), anpr (herkenning van kentekens), bluetooth en andere meetapparatuur. Deze data wordt door diverse instanties ingewonnen, opgeslagen en verwerkt tot bruikbare informatie. Drie bronnen zijn geraadpleegd om de onderzoeksvragen te beantwoorden:

- INWEVA (INtensiteiten op WEgVAKken) Verkeersintensiteiten, bronhouder Rijkswaterstaat.
- NDW (Nationale Databank Wegverkeersgegevens), bronhouder Rijkswaterstaat
- Goederenmonitor, bronhouder CBS

INWEVA staat voor INtensiteiten WEgVAKken. Het is een bestand met verkeersintensiteiten voor alle wegvakken in het beheer van Rijkswaterstaat. Deze gegevens worden onder meer gebruikt voor lucht- en geluidstudies. De intensiteiten zijn jaargemiddelde werkdagen en wekdagen per uur van de dag, onderverdeeld naar

⁶INWEVA gebruikt als definitie voor zwaar vrachtverkeer: gelede vrachtauto's. Voor NDW is de voertuigcategorie langer dan 12,2 meter gebruikt voor zwaar vrachtverkeer

drie voertuigklassen (auto's, middelzwaar transport en zwaar transport). Ongeveer de helft van de Nederlandse wegvakken bevatten gemeten intensiteiten, waarvan een groot deel vanuit NDW-data afkomstig is. De overige wegvakken zijn afgeleid van de metingen of (door een model) ingeschat.

Het NDW (Nationale Databank Wegverkeersgegevens) onderhoudt alle wegverkeersgegevens en ontsluit deze elke minuut middels het Nationale Dataportaal Wegverkeer als open data. Movares heeft toegang tot de database met wegverkeersgegevens.

Voor prognoses en verdeling van vrachtverkeer zijn CBS-cijfers geraadpleegd.

Data-voorverwerking

De meest recente versie van INWEVA (2019) is gebruikt voor de ruimtelijke analyse. Hierop zijn een aantal filters toegepast:

- Jaar: 2019
- Baansoort (BST_Code): Hoofdrijbaan (HR)
- Voertuigcategorie: Zwaar Transport (ZW) en Motorvoertuigen (MVT)
- Dagselectie: Werkdag (WR)
- Tijdstip: Etmaal (E)
- Richtingen: heen (H) en/of terug (T). In meeste gevallen alleen H beschikbaar.

Voor de temporele analyse is NDW-data bevraagd:

- De drukste snelweg qua vrachtverkeer is op een aantal hectometerpalen opgevraagd;
- De dinsdag is verkeerskundig gezien een representatieve dag van de week;
- Een aantal dinsdagen is geselecteerd ten behoeve van de etmaalverdeling;
- Voertuigcategorie >12,2m is geselecteerd als representatief voor zwaar vrachtverkeer.

Van het CBS zijn de meeste recente gegevens voor vrachtverkeer opgevraagd. Voor de verdeling van voertuigcategorieën is daarvoor data van 2017 gebruikt⁷. Voor de prognoses voor 2030 is een rapport geraadpleegd van het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM)⁸, dat gestoeld is op cijfers van het CBS. Dit rapport heeft ook al mogelijke consequenties van de coronacrisis meegenomen.

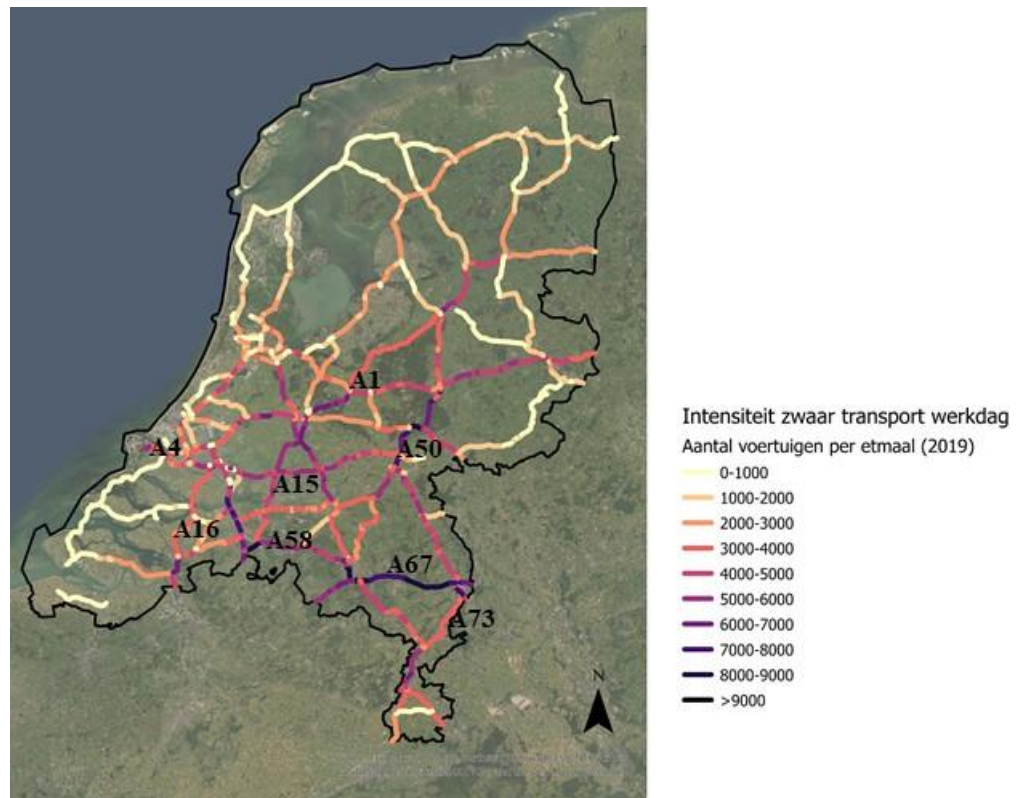
⁷ <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/80379NED/table?fromstatweb>

⁸ <https://www.kimnet.nl/binaries/kimnet/documenten/notities/2020/04/15/trendprognose-wegverkeer-2020-2025-met-daarbij-de-mogelijke-gevolgen-van-de-coronacrisis/KiM+publicatie.+Trendprognose+wegverkeer+2020-2025+met+daarbij+de+mogelijke+gevolgen+van+de+coronacrisis+def.pdf>

3.2 Ruimtelijke analyse

Ruimtelijke verdeling

De ruimtelijke verdeling van zwaar transport op het Nederlandse hoofdwegennet in 2019 is te zien in onderstaand figuur. Grote regionale verschillen zijn hierin zichtbaar. Het zuiden en midden van het land laten de hoogste aantallen zwaar vrachtverkeer per etmaal zien, gedurende werkdagen. Daarentegen zijn grote delen van Zeeland en het noorden van Nederland een stuk rustiger.



Figuur 3-1 Ruimtelijke verdeling van vrachtverkeer (zwaar transport) op het Nederlandse hoofdwegennet gemiddeld over de werkdagen van 2019, aantal voertuigen per rijbaan in enkele rijrichting gedurende één etmaal. Data afkomstig van INWEVA.

Tussen de Rijkswegen zijn er ook grote verschillen. De A67 is de drukste snelweg voor zwaar transport. Deze snelweg van de Belgische grens naar de Duitse grens is een drukke route voor vrachtverkeer van België richting het Duitse Ruhrgebied. Vanuit de Rotterdamse haven is de A16 een veel gekozen route richting België en de A16, A58 en A67 een veel bereden gekozen traject naar de Duitse grens. De alternatieve route van Rotterdam naar de Duitse grens (A15 en A50) is ook op delen relatief druk.

Uiteraard is niet een gehele Rijksweg van begin tot einde gelijk bereden. Op elke Rijksweg zijn delen die drukker zijn dan anderen. Zo is de A28 tussen Utrecht en Amersfoort druk bereden en de A1 vanaf Amersfoort (en met name vanaf Apeldoorn bij KP Beekbergen) richting Almelo (knooppunt Azelo) eveneens druk. Ook is de A2 rond Utrecht en rond Eindhoven erg druk.

In onderstaande tabel zijn de drukste snelwegen gerangschikt op basis van hun 95^e percentiel⁹ drukste wegvak. Naast de intensiteiten (absolute aantallen) van zwaar transport zijn ook relatieve aantallen zichtbaar. Zwaar vrachtverkeer percentages zijn gemiddeld tussen de 8% en 12% maar fluctueren meer op de drukste punten. Voor de A67 en A73 zijn zowel de absolute als relatieve percentages hoog. De A2 en A4 zijn door de hoge aantallen andere motorvoertuigen (personenauto's) relatief minder bereiden door vrachtverkeer.

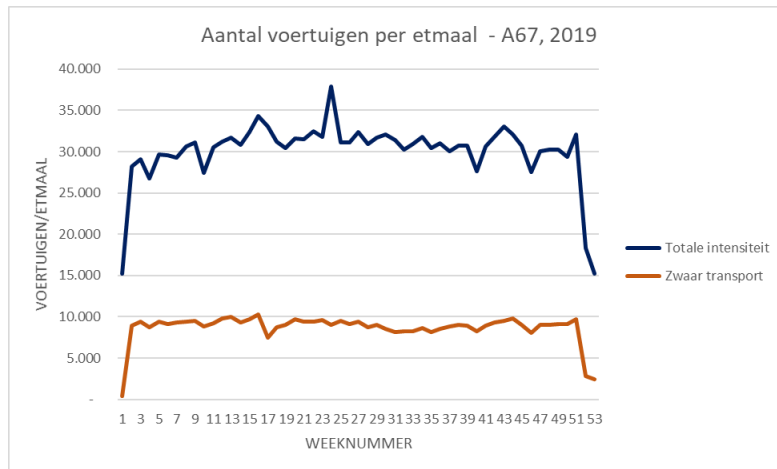
Tabel 3-1 Het aantal zwaar transportvoertuigen per etmaal (95e percentiel drukste wegvak) per Rijksweg voor de 10 drukste snelwegen ten opzichte van het totaal aantal motorvoertuigen, inclusief het aandeel vrachtverkeer.

Wegnummer	Zwaar transport (voertuig/etmaal)	Aandeel zwaar transport (%)	Alle motorvoertuigen (voertuigen/etmaal)
A67	8.572	27,4	41.800
A16	7.779	11,4	87.900
A73	7.689	22,2	42.500
A50	6.872	13,8	53.300
A27	6.505	9,7	66.400
A2	6.151	7,5	93.100
A28	6.143	8,6	65.600
A12	5.958	7,1	87.400
A4	5.956	5,8	102.700
A58	5.854	13,0	45.800

3.3 Temporele analyse

Wat is de invloed van het seizoen, en zijn er grote verschillen in intensiteit gedurende het jaar? De fluctuatie van zwaar vrachtverkeer door het jaar heen is klein. Alleen rond kerst, de jaarwisseling en de zomervakantie worden er minder vrachtvoertuigen geregistreerd, maar deze fluctuatie is minder dan bij het personenautoverkeer. De volgende grafiek is op basis van metingen langs de A67 op de dinsdag (een representatieve dag van de werkweek). Ook op andere snelwegen is deze trend zichtbaar.

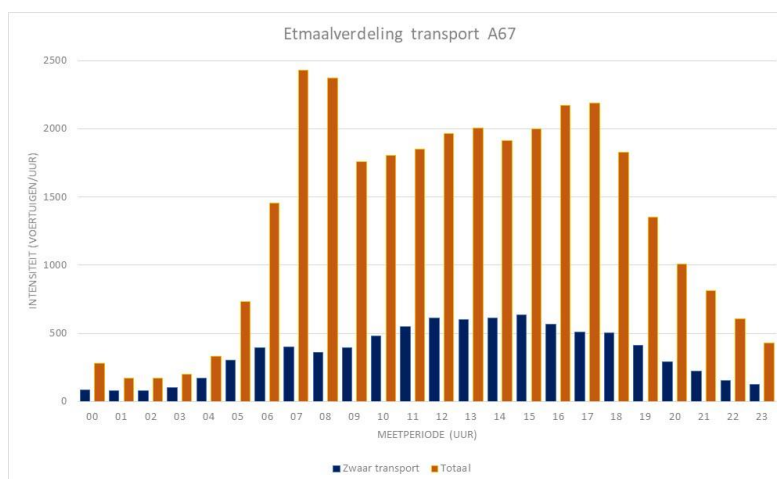
⁹ Het 95e percentiel is een getal zodanig dat 95% van de data kleiner is of eraan gelijk en 5% groter of eraan gelijk.



Figuur 3-2 Aantal voertuigen zwaar transport per etmaal op dinsdagen gedurende 2019 op de A67 ter hoogte van hectometerpaal 63.3. Bron: NDW, bewerkingen Movares

Etmaalverdeling

Gedurende de dag fluctueert het totaal aantal voertuigen per uur relatief veel, zie het volgende figuur. Voor het zwaar vrachtverkeer is de fluctuatie minder, maar ook hier is een duidelijke trend om gedurende de dag te rijden. Het drukste uur voor zwaar transport is op de meeste snelwegen in de middag rond 15 uur. De ochtend- en avondspits zijn niet terug te zien in de cijfers zoals bij het totale (woon-werk)verkeer.



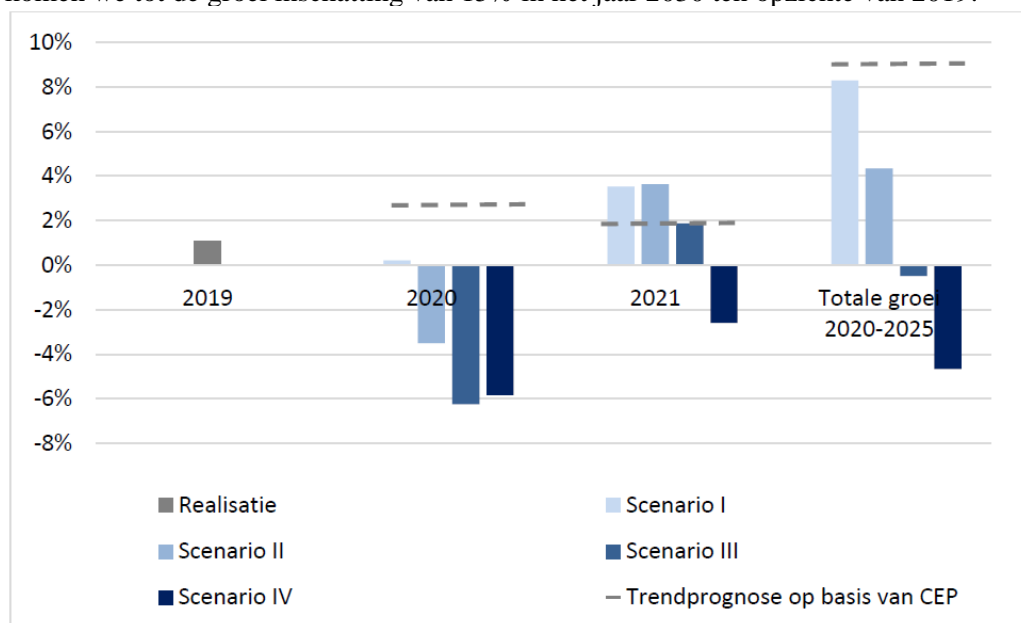
Figuur 3-3 Etmaalverdeling voor zwaar transport gebaseerd op week 40 van 2019 op de A67 ter hoogte van hectometerpaal 63,3. Bron: NDW, bewerkingen Movares

Op basis van bovenstaande analyse wordt inzichtelijk dat op de A67 gedurende week 40 in 2019 op het drukste uur van de dag (rond 15 uur in de middag) 640 voertuigen zwaar transport per uur per rijrichting zijn gepasseerd. Uit de jaaranalyse over 2019 blijkt dat de piek lag op 730 voertuigen per uur. Het totaal aantal passages zwaar transport over 2019 is bijna 2 miljoen per richting.

3.4 Toekomstscenario

Het werken met toekomstscenario's is altijd omgeven met onzekerheid, zeker nu in deze corona-tijden. Het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM) verwacht – ondanks de impact van coronacrisis – een groei van 9% voor vrachtverkeer richting 2025¹⁰. Echter, het volgende figuur schetst ook de alternatieve scenario's, waarbij wordt opgemerkt dat scenario 1 een scenario is met beperkte corona impact. Scenario 1 gaat uit van drie maanden lang contactbeperkingen naar aanleiding van het coronavirus en een matige impact, vooral in de dienstensector. Scenario 4 is het 'zwaarste' scenario dat uitgaat van twaalf maanden lang contactbeperking en een zware impact in alle sectoren.

Middels een extrapolatie van het groeicijfer van 2025 (zijnde 1,1% groei per jaar), komen we tot de groei inschatting van 15% in het jaar 2030 ten opzichte van 2019.



Figuur 3-4 Jaarlijkse ontwikkeling van vrachtverkeer op het Nederlandse wegennet in 2019, 2020 en 2021, en 2020-2025 ten opzichte van 2019. Ook worden de 4 scenario's van het CPB vergeleken met de trends van het CEP. Bron: KiM.

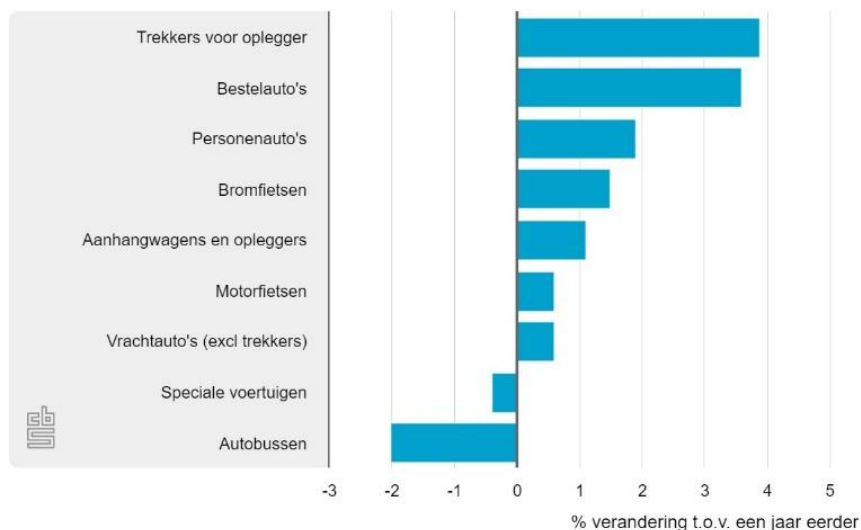
3.5 Voertuiganalyse

In dit onderzoek wordt uitgegaan van de trekker met oplegger als subcategorie die potentieel interessant is voor ERS. Uit CBS-gegevens blijkt dat 70% van de vrachtvoertuigen in Nederland behoort tot deze categorie (zowel voertuigen met Nederlands als met een buitenlands kenteken). Naast de categoriegrootte zijn er nog andere criteria denkbaar om te bepalen voor welke vrachtwagentypes ERS interessant is. Een nadere analyse hiervan is daarom een aanbeveling voor vervolgonderzoek.

¹⁰

<https://www.kimnet.nl/binaries/kimnet/documenten/notities/2020/04/15/trendprognose-wegverkeer-2020-2025-met-daarbij-de-mogelijke-gevolgen-van-de-coronacrisis/KiM+publicatie.+Trendprognose+wegverkeer+2020-2025+met+daarbij+de+mogelijke+gevolgen+van+de+coronacrisis+def.pdf>

De trekkers met oplegger is groeiend segment de afgelopen jaren en de verwachting volgens het CBS is ook dat het aandeel van dit segment binnen het totale vrachtverkeer zal blijven stijgen in de komende jaren (zie onderstaand figuur).



Figuur 3-5 Ontwikkeling voertuigenpark, 1 januari 2019. Bron: CBS

De genoemde 70% betreft een Nederlands gemiddelde. Aangezien wij met name de focus hebben op het langeafstand vrachtverkeer, zal dit aandeel waarschijnlijk hoger liggen. Richting het jaar 2030 zal dit aandeel naar verwachting verder blijven stijgen. We mogen constateren dat een aandeel van 70% trekker met oplegger op het totale vrachtverkeer naar alle waarschijnlijkheid een ondergrens betreft.

3.6 Trajectkeuze

Gebaseerd op bovenstaande bevindingen zijn sommige trajecten eerder geschikt voor ERS dan andere trajecten. Naast deze analyse zijn internationale routes op het eerste oog kansrijker, omdat dit veelal routes zijn met veel vrachtverkeer. Bij voorkeur maken deze routes dan ook onderdeel uit van het TEN-T netwerk. Ook is het aan te bevelen om naar routes te kijken met een herkomst of bestemming in een groot logistiek knooppunt. Hier denken wij met name aan de haven Rotterdam, waar in het recente verleden ook enkele truck platooning test pilots zijn gestart. Logischerwijze merken wij op dat een aaneengesloten traject tussen twee grote (snelweg)knooppunten ook voor de hand liggend is en de voorkeur heeft boven een 'gehele snelweg' van begin tot einde. Op basis van deze eerste verkenning naar de mogelijkheden, komen we tot een aantal voor de hand liggende trajecten om te starten:

- Een deel van de A1, zijnde Amersfoort/KP Hoewelaken – Almelo / KP Arzelo) (90 km)
- De A15 vanaf Rotterdam (KP Ridderkerk) tot Arnhem (104 km)
- De A16 van Rotterdam tot de grens met België (46 km)
- De A58: KP Galder- KP Batadorp – grofweg van Breda tot Eindhoven (48 km)
- De A67 vanaf de grens van België tot Duitsland (74 km)

Bij de keuze voor de Nederlandse routes is geen rekening gehouden bij een (eventuele) aansluiting van deze routes op de routes/trajecten in het buitenland.

De volgende tabel geeft een cijfermatig overzicht van het totaal aantal voertuigen dat jaarlijks over de geselecteerde trajecten zal rijden en een gemiddelde van het aantal trekkers met oplegger dat er op het drukste uur per strekkende kilometer zullen rijden over het gehele traject.

Tabel 3-2 Geselecteerde snelwegdelen met groeiverwachting zwaar transport

	Lengte ERS-OC traject	Zwaar transport totaal in 2019	Zwaar transport piek in 2019	Trekkers met oplegger totaal in 2030	Trekkers met oplegger piek in 2030
Traject	[km]	[voertuigen/j per richting]	[voertuigen/uur per richting]	[voertuigen/j per richting]	[voertuigen/km per richting]
A1 - Amersfoort/ KP Hoevelaken tot Almelo / KP Azelo	90	1.204.000	460	970.000	5
A15 - Rotterdam (KP Ridderkerk) tot Arnhem	104	1.112.000	680	890.000	7
A16 - Rotterdam tot de grens met België	46	1.443.000	690	1.160.000	7
A58 - KP Galder tot KP Batadorp (Breda tot Eindhoven)	48	1.483.000	690	1.190.000	7
A67 - grens België tot Duitsland	74	1.941.000	730	1.560.000	7

Bovenstaande tabel toont per geselecteerd snelwegdeel het zwaar transport in 2019 (jaarvolume en piek), evenals de verwachtingen t.a.v. trekkers met oplegger in 2030. Per rijrichting komt dit neer op 300-600 trekkers per uur.

3.7 Discussie

Vanwege het verkennende karakter van deze analyse zijn er diverse aandachtspunten die in een nader onderzoek verder bestudeerd dienen te worden. Deze betreffen onder meer:

- Datakwaliteit. Een nadere analyse naar voor de hand liggende trajecten zoals hierboven geschreven, zal meer inzicht geven in het vrachtverkeer en met name de trekker met oplegger combinatie. Telcijfers zoals van INWEVA of NDW specifiek voor trekkers met oplegger zijn immers niet generiek beschikbaar. Aanbevolen wordt om hier nader onderzoek naar te verrichten, zeker voor de hierboven benoemde trajecten.
- In onze analyse is niet expliciet rekening gehouden met het internationale vrachtverkeer. Dit verkeer is uiteraard wel opgenomen in de totale verkeersintensiteiten, maar de verwachting is dat het percentage trekker met oplegger hoger zal liggen.
- Eveneens kan worden uitgezocht in hoeverre deze combinatie frequent op de trajecten rijdt. Betreft dit dagelijkse ritten of zijn het veelal incidentele ritten?

Antwoorden op dergelijke vragen zijn belangrijk om de diverse business cases nauwkeuriger te krijgen. Frequente ritten betekent immers dat het gebruik van het ERS systeem toeneemt en dus ook de terugverdientijd van de investering in de infrastructuur korter wordt. Middels een onderzoek naar herkomst en bestemmingslocaties, het benaderen van grote logistieke centra en uitkomsten van een verkeersmodel kan hier verder onderzoek naar gedaan worden.

In deze verkenning is geen rekening gehouden met bruggen, tunnels en andere 'obstakels' die zich op en langs de weg bevinden. Voor specifieke trajectstudies dient te worden onderzocht welke oplossingen (reguliere bovenleiding, aangepast systeem, of geen bovenleiding) hier de voorkeur hebben.

In een nader onderzoek dient eveneens te worden gekeken naar de verkeersveiligheid van een dergelijk systeem. Vragen of weggebruikers niet worden afgeschrikt door de kabels boven de weg dienen beantwoord te worden. Hiervoor is onderzoek al voorhanden vanuit het buitenland. Naast de verkeersveiligheid is ook een openstaande vraag in hoeverre dit impact heeft op de wegcapaciteit.

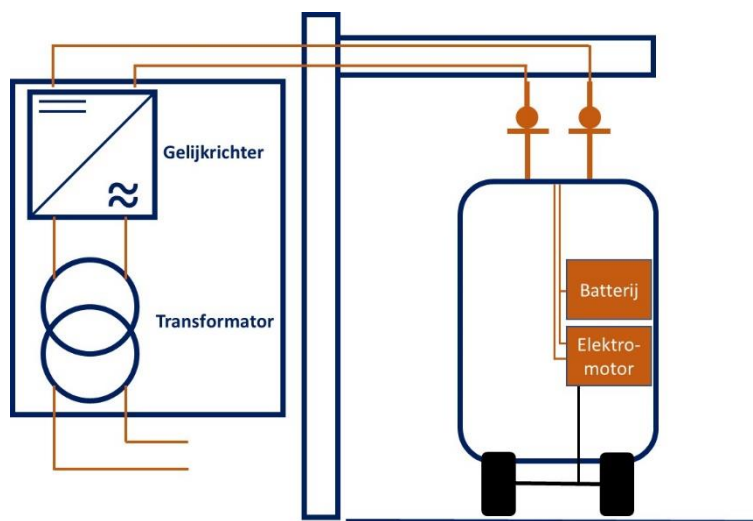
Ook zijn de snelwegen in Nederland voorzien van vele reis/route-informatiepanelen vanwege de vele op-/afritten en zijn op veel plaatsen matrixborden boven de snelweg geplaatst. Onderzocht dient te worden of deze informatieborden goed leesbaar blijven.

4 Kosten ERS-OC infrastructuur

Sterk bepalend voor het succes van ERS-OC zijn de dimensionering en kosten van een bovenleidingsysteem. In dit hoofdstuk wordt het systeem nader beschreven, waarna op basis van een mogelijk traject boven de A15 een dimensionering met investeringskosten wordt bepaald.

4.1 Beschrijving concept

Voor rijden onder een bovenleiding is, naast de bovenleiding zelf, ook een zogenaamd gelijkrichterstation nodig. Het gelijkrichterstation zet de wisselspanning van het openbare net om naar de gelijkspanning die op de bovenleiding staat.



Figuur 4-1 ERS-OC systeemoverzicht

Om dat mogelijk te maken zijn er, vanuit het openbare net gezien, de volgende technische installaties nodig:

- Netaansluiting bij een Regionale Net Beheerder (RNB);
- Wisselspanning middenspanning kabel van 10-30 kV;
- Transformator die de middenspanning verlaagt naar een voor de bovenleiding acceptabele waarde;
- Gelijkrichter, die de 3-fasen wisselspanning omzet in gelijkspanning;
- Gelijkspanningskabel naar de bovenleiding;
- Bovenleiding, bestaande uit 2 rijdraden en 2 draagkabels.

De dimensionering van het ERS-OC systeem, en daarmee de kosten, zijn zeer sterk afhankelijk van:

- A. De voertuig eigenschappen. Met name de luchtweerstand en het actuele gewicht van de lading;
- B. De snelheid van het voertuig;
- C. De onderlinge afstand tussen de voertuigen en daarmee de energievraag per kilometer trajectgedeelte;
- D. Het al dan niet opladen van de aanwezige batterij in het voertuig.

Op basis van deze gegevens kan de elektrische voeding gedimensioneerd worden.

Bij de berekeningen wordt uitgegaan van een energievraag van 1,38 kWh/km per trekker met oplegger, plus een eventuele energievraag voor het opladen van de batterij.

4.1.1. Conceptontwerp en verliezen

De dimensionering van het systeem bepaalt tevens de energieverliezen. Iedere geleider waar stroom doorheen loopt kent verliezen in de vorm van warmte. Deze vermogensverliezen [P] zijn lineair afhankelijk van de weerstand [R] van de geleider en kwadratisch met de stroom [I] door de geleider:

$$P_{\text{verlies, geleider}} = I^2 \cdot R$$

Verliezen in de middenspanningskabel, transformator en bovenleiding zorgen voor een lagere spanning bij het voertuig en daarmee een lager maximaal af te nemen vermogen per voertuig.

Om het totale spanningsverlies te beperken zijn bij de dimensionering van de infrastructuur de onderstaande parameters te beïnvloeden:

1. Middenspanningskabel met een grotere doorsnede

Als de doorsnede van de, meestal aluminium, geleider groter wordt, neemt de weerstand lineair af. Wel is een kabel met een grotere doorsnede lastiger te buigen (grotere buigstraal), waardoor het tracé wat lastiger wordt.

Uiteraard is de kabel wel duurder. Bij de definitieve dimensionering dient berekend te worden of de extra diameter opweegt tegen de lagere verlieskosten;

2. Bovenleiding met een grotere geleider doorsnede

Door het verlagen van de weerstand zal de spanning bij het voertuig minder dalen. Om dit te realiseren zijn er twee mogelijkheden

- Het ophangen van een extra geleider (versterkingsleiding) zoals gangbaar bij ProRail. Dit vraagt wel om een zwaardere draagconstructie;
- Het plaatsen van een extra geleidingskabel in de grond, die vervolgens periodiek met de bovenleiding wordt verbonden;

3. Meer gelijkrichterstations

Door het verkleinen van de onderlinge afstand tussen de gelijkrichterstations, wordt de afstand tussen het gelijkrichterstation en het voertuig kleiner en daarmee de weerstand;

4. Dwarskoppelingen

Door het verbinden van de bovenleidingen boven de beide rijwegen wordt de stroom beter verdeeld waardoor de verliezen gereduceerd worden.

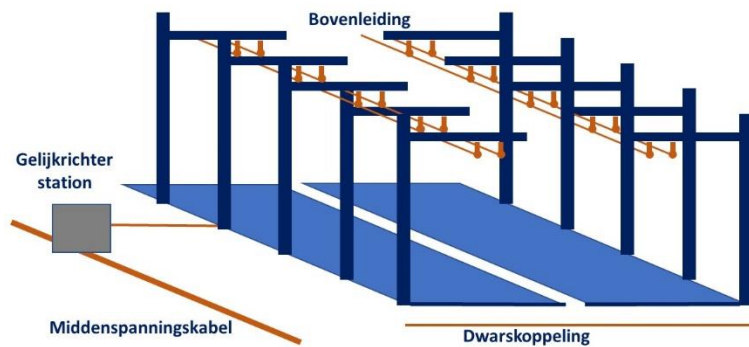
5. Hoger bovenleiding spanning

Een hogere spanning zal voor een lagere stroom zorgen en daarmee een geringer spannings- en energieverlies in de bovenleiding. In het trambedrijf worden spanningen van 600 V en 750 V gebruikt. Deze spanningen zijn Europees gestandaardiseerd¹¹ en in de openbare ruimte geaccepteerd. Deze spanningen worden ook voor trolleys gebruikt.

ProRail gebruikt voor treinvervoer 1500 V op de bovenleiding. Voor een wegvoertuig is dit een hoge spanning, die voor elektrische isolatieproblemen zorgt. Om voor een gebruiksvergunning in aanmerking te komen zullen uitgebreide safety cases uitgevoerd moeten gaan worden.

In de Duitse ERS pilots gebruikt Siemens 600 V als voedingsspanning.

¹¹ NEN-EN50502:2015. Spoorweg en soortgelijk geleid vervoer – Rollend materieel – Elektrische uitrusting in trolleybussen – Veiligheidseisen en stroomafname systemen



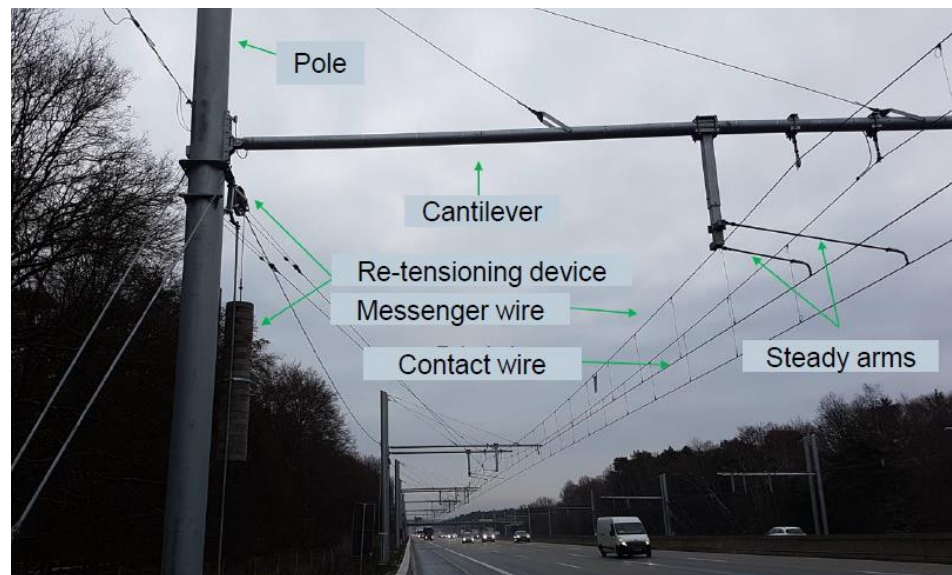
Figuur 4-2 Dimensionering ERS-OC componenten

4.2 Aanleg

In deze paragraaf worden de belangrijke aandachtspunten geschetst die verbonden zijn met de aanleg van een ERS-OC systeem.

Bij het realiseren van een ERS-OC systeem zijn de volgende werkzaamheden te onderscheiden:

- Kabels leggen langs de weg; middenspanning- en gelijkspanningskabels;
- Plaatsen van de draagconstructie (de zogenaamde *pole* en *cantilever*);
- Draden trekken. Dat zijn er minimaal 4: 2 rijdraden (contact wires) en 2 draagkabels (messenger wires)



Figuur 4-3 Opbouw bovenleidingsysteem (eHighway, Siemens)

Bij de aanleg zullen met name (lage) viaducten en tunnels lokaal voor technische uitdagingen kunnen zorgen. Bij viaducten wordt dit opgelost door de bovenleiding tijdelijk te verlagen en de draagkabel weg te laten.



Afbeelding 4.4 Bovenleiding onder laag viaduct [e-highway Siemens]

Figuur 4-4 Bovenleiding onder laag viaduct (eHighway, Siemens)

Bij knooppunten en tunnels kan er voor gekozen worden om tijdelijk de gehele bovenleiding weg te laten. Het voertuig rijdt dan het betreffende weggedeelte op de batterij.

Onderzocht moet worden of de bovenleiding (omgeving)vergunning plichtig is. Voor de gelijkrichterstations is dat zeker het geval.

- Installeren gelijkrichterstation. Er zijn op de markt kant en klare gelijkrichterstation beschikbaar. Hieronder een voorbeeld van ABB voor een 2300 kVA gelijkrichter.



Figuur 4-5 Voorbeeld prefab gelijkrichterstation (DC e-house ABB)

Voor deze gelijkrichterstations moeten locaties gevonden worden met ongeveer gelijke tussenafstand ($\pm 5\%$), en bij voorkeur aan dezelfde zijde van de snelweg in verband met de voedende middenspanningskabels. Ook moet er per gelijkrichtstation ruimte zijn voor minimaal 1 parkeerplaats.

De ontsluiting kan via een afrit van de snelweg. Indien dat op bezwaren stuit, zal er een ontsluiting aan de “landzijde” moeten komen. Omdat het om veel locaties gaat kan dit een moeizaam en langdurig proces worden.

4.2.1. *Conceptontwerp en opschaling*

Zoals later in dit hoofdstuk wordt aangetoond, gaat een ERC-OC systeem gepaard met grote investeringen. Technisch gezien is het mogelijk om een basissysteem te ontwikkelen dat op termijn kan worden opgeschaald zodat meer laadvermogen beschikbaar komt.

Om vanuit een basis infrastructuur, op te schalen zijn er drie mogelijkheden:

1. Het later aanbrengen van een extra geleider. Bij de initiële aanleg moet de bovenleiding hier wel alvast op worden gedimensioneerd om later de extra mechanische (wind)belasting aan te kunnen;
2. Het later aanbrengen van een parallelle gelijkspanning kabel;
3. Later aanbrengen van extra gelijkrichterstations.

4.3 *Beheer*

T.a.v het onderhoud van het ERS-OC systeem kunnen we een onderscheid maken in het bovenleidingsysteem, de gelijkrichterstations en de voedingskabels.

4.3.1. *Bovenleiding*

Beheer van het bovenleidingsysteem kent drie aandachtsgebieden:

1. Rijdraad breuk;
2. Rijdraad slijtage;
3. Conservering draagconstructie.

Aan de draagkabel is amper of geen onderhoud noodzakelijk.

Rijdraad breuk

Rijdraad breuk kan veroorzaakt worden door een te hoge temperatuur, of een mechanische breuk door een slechte stroomafnemer.

- Een bovenleiding kan te warm worden door overbelasting (te veel vraag) in combinatie met een hoge buitentemperatuur. Een bovenleiding is ontworpen voor omgevingstemperaturen liggend tussen -20°C en $+40^{\circ}\text{C}$. De maximale geleider temperatuur is $+60^{\circ}\text{C}$. Daarboven verliest de geleider de mechanische sterkte. De verhoging van 20° is het gevolg van de stromen en zonstraling in combinatie met koeling door wind. Voor de afkoeling door de wind wordt meestal gerekend met $0,6\text{ m/sec}$. Daarnaast zal een passerende stroomafnemer ook rijwind veroorzaken. Om deze reden wordt als minimale windsnelheid 1 m/sec gehanteerd. Deze waarde komt overeen met klasse SW 2 uit de NEN-EN 50125:

Tabel 4-1 Wind snelheid tabel [NEN-EN50125]

Table 3 - Wind velocities

Class	Wind velocity m/s
SW 1 (low)	0,6
SW 2 (normal)	1,0
SW 3 (heavy)	2,0

Pressure pulses (e. g. due to passing trains) should be taken into account, where applicable.

Als de bovenleiding temperatuur te hoog wordt, kan het contragewicht (om de rijdraad strak te houden) op de grond komen. Hierdoor valt de trekspanning op de draden weg en kan rijdraadbreek optreden.

Mechanische breuk: de bovenzijde van een stroomafnemer (pantograaf) is voorzien van een koolstof strip (sleepestuk). Deze koolstof strip slijt. Is de slijtage te groot, dan zal een automatisch systeem de stroomafnemer op het voertuig laten zakken (item 1 in figuur 4.7). Gebeurt dat niet, dan kan de stroomafnemer de rijdraad beschadigen of de verbinding tussen de rijdraad en de draagkabel doorsnijden.

Stroomafnemer onderhoud moet door de eigenaar van het voertuig uitgevoerd worden. In het spoor hangen op enkele plekken camera's die de kwaliteit van het sleepestuk meten. Bij schade kunnen de kosten dan verhaald worden.



Figuur 4-6 Stroomafnemer op voertuig (www.scania.com)

Rijdraad slijtage

Bij iedere stroomafnemer passage zal de rijdraad slijten. Bij de mechanische dimensionering van de bovenleiding wordt rekening gehouden met 20% rijdraad verlies. Bij ProRail wordt, als vuistregel, uitgegaan van minimaal 2 miljoen stroomafnemer passages bij een rijdraad van 100 mm² Cu. In de uitvoering voor elektrische voertuigen is er sprake van een rijdraad van 150 mm² Cu. Dan treedt bij 3 miljoen passages de maximale slijtage op. De te vervangen draad kan worden hergebruikt als materiaal in nieuwe draden.

Nu zijn er uiteraard verschillen tussen slijtage in een spoor en een wegsituatie. Treinen zullen iets gelijkmatiger en meer schokvrij rijden, wat suggereert dat vrachtwagens meer slijtage veroorzaken. Aan de andere kant rijden vrachtwagens langzamer, wat weer tot lagere slijtage leidt. Eerste Siemens simulaties suggereren vervanging na meer dan 10 miljoen passages, maar de praktijkervaringen ontbreken nog. Binnen deze studie wordt uitgegaan van vervanging van een 150 mm² koperen rijdraad na 3 miljoen passages (20% slijtage).

In het vorige hoofdstuk is bepaald dat er op de drukste wegen in 2030 sprake is van één tot anderhalf miljoen trekkers per jaar per rijrichting. Indien al deze trekkers gebruik zouden maken van de bovenleiding, dan is deze naar verwachting binnen 2 tot 3 jaar aan vervanging toe.

Het vervangen van een rijdraad zal grote impact hebben op het wegverkeer. Daarom zal dit bij voorkeur 's nachts plaatsvinden.

Conservering draagconstructie

Bij het ontwerp van de draagconstructie kan voor een onderhoudsarme uitvoering gekozen worden. Hiermee wordt voorkomen dat er periodiek geschilderd moet worden.

- 4.3.2. *Gelijkrichterstations* Aan gelijkrichterstations hoeft amper onderhoud gepleegd te worden. Een jaarlijkse inspectie van met name de filters in de luchtbehandeling en een 5 jaarlijkse onderhoudsbeurt volstaat.
- 4.3.3. *Kabels* Aan in de grond gelegen kabels wordt geen (periodiek) onderhoud uitgevoerd. Alleen een defect, meestal door graafschade, moet hersteld worden.
- 4.3.4. *Milieubelasting* De grootste milieubelasting wordt veroorzaakt de slijtage aan de rijdraad (koper) en sleepstuk van de pantograaf (koolstof) zijn. Met name de emissie van koper is milieu belastend door de toxische eigenschappen.
In de Duitse pilots wordt een koperen rijdraad van 150 mm² toegepast. Bij een soortelijk gewicht van 8.900 kg/m³ heeft deze een gewicht van 1.335 kg per km. Bij een slijtage van 20% en 4 draden (2 per rijstrook) is dit een gewichtsverlies over de levensduur van ruim 1.000 kg/km geëlektrificeerde snelweg (twee richtingen).

Hoeveel koper is dit nu over de levensduur van een enkele vrachtwagen? Uitgaande van 50% gebruik van de bovenleiding, twee rijdraden van 150 mm² elk en een totaal kilometrage van 960.000 km, komt dit overeen met 85 kg koper per voertuig. Nader onderzoek dient uit te wijzen of dit een acceptabel materiaalverlies is.

Dit zou betekenen dat voor een traject van 90 km A1 bij 1 miljoen trekkers per jaar in 2030 er een jaarlijks koperverlies van 30 ton zou zijn. Dit lijkt, naast mogelijke gezondheidsaspecten, serieuze vragen op te roepen ten aanzien van circulariteit. Vervolgonderzoek is hier vereist.
- 4.3.5. *Beschikbaarheid grondstoffen* Bij afwegingen ten aanzien van een ERS-OC infrastructuur zal slijtage van de bovenleiding in verhouding moeten worden gezien tot de eindigheid van de winbare voorraad van metalen. De economische winbare voorraad voor zilver is 27 jaar (zilver zit in geringe mate in de legering van de rijdraad)¹². Voor koper wordt ≈ 60 jaar aangehouden bij gelijkblijvende vraag. Bij een jaarlijkse groei van 2 % neemt dit af tot ongeveer 25 jaar. Door deze ontwikkeling zal de grondstof prijs toenemen. Een verdere analyse van de eindigheid van grondstoffen valt buiten de scope van dit onderzoek.

Verder is er anno 2020 een groot gebrek aan technisch personeel, met name in de engineering en werkvoorbereiding. Dit is overigens niet specifiek voor ERS-OC.

¹² <https://www.duurzaambo.nl/kennisbank/57-kennisbank/planet/4347-schaarsegrondstoffen-2>

<https://seekingalpha.com/article/1110481-coppers-supply-demand-imbalance>

4.4 Voorbeeld: case A15

Als case studie wordt beschreven hoe het A15 traject tussen Maasvlakte (C2 bocht) en Knooppunt Ressen/Bemmel kan worden geëlektrificeerd. Het traject is (afgerond) 136 km lang. In de bijlage zijn de dimensionering details weergegeven.



Figuur 4-7 Beschouwde A15 traject

Gezien een aantal barrières is het niet zinvol om overal bovenleiding aan te brengen. Op het beoogde traject wordt geen bovenleiding voorzien bij de tunnels (Calandkanaal, Botlek en de Noord) en het gedeelte van het gemeenschappelijke traject met de A16. In de verkeersanalyse (vorige hoofdstuk) is bepaald dat de drukste wegen in Nederland rond 2030 een piek aan trekkers kennen per richting van 300-600 trekkers per uur en 5 tot 7 trekkers per kilometer. In de onderstaande berekeningen is in eerste instantie uitgegaan van een lager maximaal gebruik van deze snelweg: 2.000 ladende trekkers per dag (540.000 per jaar) met een piekdrukke van 4 trekkers per kilometer. Bij dit aantal lijkt namelijk een praktisch maximum te liggen voor het aantal gelijkrichter stations dat hier via de regionale netbeheerder kan worden aangesloten (het aantal middenspanningskabels dat naast elkaar kan worden neergelegd). Boven dit aantal lijkt voeding middels een gesloten privaat net wenselijker (zie ook verderop).

Tevens is uitgegaan van een energie afname van 1,38 kWh/km, een minimale vermogensvraag van 110 kW en de wenselijkheid om tijdens het rijden ook de batterij te kunnen opladen.

4.4.1. Dimensionering infrastructuur

Een belangrijke systeemkeuze betreft de spanning op de bovenleiding. Vanuit spoorweg normen komen drie spanningen in aanmerking: 600 V, 750 V of 1500 V. Conform de eerder genoemde Duitse pilots wordt hier de gehanteerde spanning van 600 V aangehouden.

De voertuigen worden vanuit de bovenleiding gevoed door de gelijkrichterstations. In de Duitse pilot wordt rijdraad met een doorsnede van 150 mm² Cu (CuMg0,5) en een draagkabel van 120 mm² Bz (BzII120) toegepast¹³. Belangrijk in deze keuze is dat een dergelijke draad met een continue stroom van maximaal 1500 A belast kan worden. Als lokaal de stroombelasting hoger wordt, moet er een parallelle kabel gelegd worden. De nominale spanning van het gelijkrichterstation is 670 V (Kuhnel 2018) (conform EN-normen 600V).

4.4.2. Spanning, stroom en verliezen

Voor de bepaling van het aantal gelijkrichterstations en de (bovenleiding) verliezen is het aantal voertuigen per kilometer van belang. In deze paragraaf wordt de maximale tussenafstand tussen twee gelijkrichterstations bepaald o.b.v. het door de bovenleiding te leveren vermogen.

¹³ [Kuhnel, blz. 92]

In de onderstaande tabel staan de resultaten van een spanningstoets voor voertuigen met een onderlinge afstand van 250 meter en een afgenomen vermogen van 110 kW. De voedingskabel is van het type XLPE 3x1x630 mm² aluminium en er wordt een lengte van 6.436 meter aangenomen. Dat is de gemiddelde lengte van de middenspanningskabel op het A15 traject (zie de bijlage). De weerstand van de kabel en gelijkrichterstation is dan afgerond 9,4 mΩ op 600 V niveau.

In een spanningstoets is onderzocht bij welke tussenafstand tussen de gelijkrichter stations de spanning op de bovenleiding te sterk zakt. Onderstaande tabel toont de volgende resultaten:

- Bij een tussenafstand tussen gelijkrichter stations van 2 km en 3 km is er voldoende vermogen om de voertuigen voort te bewegen;
- Bij 4 km daalt de spanning halverwege onder het minimum van 400 V. De voertuigen zijn dan niet meer in staat om 1,38 kWh/km af te nemen;
- Indien er voldoende vermogen beschikbaar moet zijn om ook de batterij op te laden dan is een tussenafstand van maximaal 2 kilometer vereist. In dat geval is er per voertuig minimaal 2,2 kWh/km vermogen beschikbaar (178 kW). Dit betekent dat een voertuig voor iedere 10 km gereden een extra actieradius kan laden van minimaal 6 km. Indien er minder dan 4 voertuigen per kilometer rijden neemt dit vermogen toe.

Tabel 4-2 Overzicht spanningstoets

Afstand Gelijkrichter- station	Criterium	Afgenomen vermogen	Minimale Spanning	Vermogen netbeheerder	Rendement	Verlies	Max. stroom bovenleiding
2 km	1,38 kWh/km	1,38 kWh/km	597 V	2048 kW	91 %	87 kW/km	831 A
3 km	1,38 kWh/km	1,38 kWh/km	511 V	3345 kW	82 %	300 kW/km	1279 A
4 km	> 400 V	1,2 kWh/km	409 V	4556 kW	72 %	318 kW/km	1750 A
2 km	Max. stroom bovenleiding 1500A	2,2 kWh/km	550 V	3417 kW	86 %	232 kW/km	1500 A

4.4.3. Voeding vanuit net

In principe zijn er twee mogelijkheden om de gelijkrichterstations te voeden vanuit het openbare net:

1. Individuele voeding met ieder gelijkrichterstation een eigen middenspanning aansluiting. Het beheer hiervan ligt bij de regionale netbeheerder;
2. Een gesloten privaat net met eigen middenspanningskabels langs de weg, gevoed uit de 150/50 kV stations. In dit geval dient er een aparte netbeheerder te worden opgericht conform eisen van de ACM¹⁴.

Een belangrijk verschil tussen deze twee opties betreft dus het eigendom en beheer van de middenspanningskabels langs de weg.

Individuele voeding

Het is mogelijk om de vereiste gelijkrichterstations een individuele voeding op 10 kV, resp. 13 kV te geven. Daarvoor zijn door de regionale netbeheerder vaste tarieven bij de ACM vastgelegd. Stedin¹⁵ (A15 traject in provincie Zuid-Holland) geeft aan dat in

¹⁴ www.acm.nl

¹⁵ <https://www.stedin.net/zakelijk> [bezoekt op 15/10/2020]

deze situatie een aansluitvergoeding van € 270.000 per aansluiting wordt gerekend, plus € 152,- per meter middenspanningskabel. Tarieven van Liander (A15 traject in provincie Gelderland) zijn alleen op aanvraag beschikbaar en ons niet bekend. Aangekomen is dat deze overeenkomen met de Stedin tarieven.

Voor de vereiste vermogens dienen de regionale netbeheerders kabels aan te leggen vanuit reeds bestaande schakelstations. Onderstaande tabel geeft de betreffende stations weer langs de A15, evenals het aantal gelijkrichterstations en de door regionale netbeheerder aan te leggen kabellengte. Hierin is af te lezen dat voor een te elektrificeren traject van 121 km 64 gelijkrichterstations nodig zijn en bijna 400 km kabel.

Tabel 4-3 Kabellengte A15 traject

Voedingssectie	Afstand station-A15 [m]	Voeding lengte bovenleiding [km]	Aantal gelijkrichter stations	Totale lengte kabel [km]
Europoort	250	14	8	34
Gerbrandyweg	1.800	8	5	26
Waalhaven	2.000	15	8	48
Alblasserdam	250	11	6	27
Gorinchem	2.000	28	14	114
Tiel	250	24	13	102
Dodewaard	250	14	6	20
Bemmel	3.000	7	4	23
Totaal		121	64	394

Gesloten privaat net

Gezien de hoge vermogensvraag wordt voor 30 kV transportspanning gekozen. Een lagere spanning (10, 20 of 25 kV) zal meer kabels vergen. Een hogere spanning (50 kV) geeft complexe en dure installaties. 30 kV valt bij de internationale normen nog onder “middenspanning” en is daardoor goedkoper.

Consequentie van deze keus is dat er op de locatie van de netwerkbedrijven een 150/30 of 50/30 transformator noodzakelijk is.

4.5 Capex

Voor het bepalen van de investeringen worden de volgende onderdelen beschouwd:

- Bovenleidingsysteem, bestaande uit de draagconstructie (masten met fundatie), rijdraden en draagkabel. Ter beperking van de verliezen is er tevens een versterkingskabel langs de masten gelegd (2x1x1200 mm² Al) en zijn er dwarskoppelingen tussen de beide bovenleidingen gelegd (2x1x630 mm² Al);
- Gelijkrichterstations (inclusief vergunningen, ontsluiting, fundering, plaatsing, etc.);
- Aansturing en bewaking: control center, glasvezelkabel, aansluiting stations;
- Netvoeding (individueel aansluiten of gesloten privaat net);

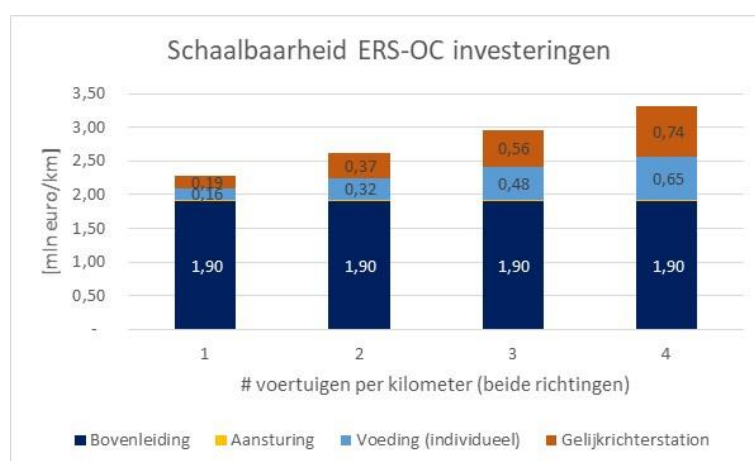
Bij het bepalen van de kosten hiervan wordt uitgegaan van de situatie rond de A15. Onderstaande tabel toont de resultaten van deze oefening. Zichtbaar hierin is dat de kosten variëren tussen 3.1 miljoen Euro per km (privaat net) en 3.3 miljoen Euro per km.

Tabel 4-4 Overzicht investeringen ERS-OC systeem (Movares, Stedin)

Categorie	Onderdelen	Commentaar	Eenheid	Prijs per eenheid	Prijs per richting	Capex A15	Kosten/km (heen + terug)
Bovenleiding	Directe bouwkosten	Mast (iedere 30 m), fundatie, draden	[Euro/m]	300	36.300.000	72.600.000	600.000
	Overige kosten	Incl. risico's, vergunningen, grond, ontwerp	[Euro/m]	450	54.450.000	108.900.000	900.000
	Versterkingskabel	Enkele kabel langs traject	[Euro/m]	315		38.115.000	315.000
	Dwarskoppeling bovenleiding	Iedere 500 m	[Euro/st]	42.000		10.164.000	84.000
Gelijkrichterstation	In totaal 64 stuks langs A15	Incl. vergunning, ontsluiting, fundering, etc.	[Euro/st]	1.300.000		83.200.000	687.603
	Connectie glasvezel		[Euro/st]	100.000		6.400.000	52.893
Aansturing en bewaking	Glasvezel		[Euro/m]	10		1.210.000	10.000
	Control center		[Euro/st]	2.000.000		2.000.000	16.529
Voeding 1) individueel	MS kabel	Totaal 400 km (netbeheerder)	[Euro/m]	152		60.800.000	502.479
	Aansluiting 3500 kVA	64 stations (netbeheerder)	[Euro/st]	270.000		17.280.000	142.810
Voeding 2) privaat net	MS kabels	Diverse lengtes en diameters				30.200.000	249.587
	Aansluiting 150/50 KV	In totaal 8 stuks	[Euro/st]	2.500.000		20.000.000	165.289
	Transformator	In totaal 8 stuks	[Euro/st]	1.000.000		8.000.000	66.116
Totaal optie 1)		Bij individueel aansluiten				400.669.000	3.311.314
Totaal optie 2)		Bij gesloten privaat net				380.789.000	3.147.017

Verschillen met eerdere studies naar dergelijke kosten betreffen met name de kosten van de bovenleiding (Wietschel 2017). Daar treffen we kosten aan van € 1.000,- per kilometer snelweg (beide richtingen), waar deze studie uitkomt op bijna € 1.900,- per kilometer. Wij vragen ons hierbij af of de kosten van het realiseren van een bovenleidingsysteem op een drukke snelweg door deze bronnen onderschat wordt.

In hoeverre zijn deze kosten nu schaalbaar met het aantal voertuigen? Helaas is dat maar beperkt zo. In het geval van individueel aansluiten kan het aantal gelijkrichterstations (de connectie met het glasvezel) en de voeding worden opgeschaald met de vermogensvraag. De investeringskosten van de bovenleiding (mast, fundatie, draden, etc.) zijn echter onafhankelijk van het aantal rijdende voertuigen, zie onderstaande figuur.



Figuur 4-8 Schaalbaarheid ERS-OC investeringen (2020)

- 4.6 OPEX In deze paragraaf wordt een inschatting gegeven van de operationele aspecten horende bij een ERS-OC systeem.
- 4.6.1. *Beheerkosten* De beheerkosten bestaan hoofdzakelijk uit personeel, huisvesting en vervoer. Naast het dagelijkse beheer moet er ook rekening gehouden worden met vol continue bewaking van de installatie. Deze functie kan bij de A15 bijvoorbeeld uitbesteed worden aan de betreffende regionale netbeheerder Stedin of Liander.
- 4.6.2. *Vervanging bovenleiding* De voornaamste onderhoudsactiviteiten rond de bovenleiding betreffen het vervangen van de rijdraad. Een vervangingsploeg kan per dag ongeveer 1,3 kilometer vervangen. De rijdraad zal echter over het hele tracé op hetzelfde moment vervangen moeten worden. Daardoor zal er een piek in de werkzaamheden zijn.
- Movares heeft de kosten van vervanging van twee rijdraden begroot op € 50.000,- per kilometer rijbaan. Deze kosten zijn inclusief materiaal, verkeersmaatregelen en personeel. Uitgaande van vervanging na 3 miljoen passages komt dit neer op 1,67 ct per gereden kilometer.
- Het is mogelijk dat de bovenleiding beschadigd wordt door een defecte stroomafnemer op het voertuig. Dat vraagt een volcontinue stringdienst. Dat kan uitbesteed worden. De schade aan de bovenleiding kan verhaald worden, indien op regelmatige afstand de status van de stroomafnemer wordt gemeten. Bijvoorbeeld door, bij passage, een foto ervan te nemen. Dergelijke systemen past ProRail ook toe.
- 4.6.3. *Overig onderhoud* Een gelijkrichterstation vraagt weinig jaarlijks onderhoud. Jaarlijkse inspectie en licht onderhoud is voldoende. Wel dient er iedere 4 jaar groot onderhoud plaats te vinden. Verder is er sprake van onderhoud aan de afspanning (contragewichten) en periodieke inspectie van de masten en bovenleiding. De totale kosten voor overig onderhoud worden hiermee geraamd op € 3.000,- per kilometer per jaar per rijrichting, ofwel € 6.000,- per kilometer snelweg per jaar.
- 4.6.4. *Periodieke kosten regionaal netbeheer* De regionale netbeheerder vraagt een jaarlijkse vergoeding van de aansluiting. In optie 1 (individuele netaansluiting per gelijkrichterstation) zijn de kosten te berekenen. Uitgaande van 64 aansluitingen van 3500 kVA en 400 km middenspanningskabel komen deze kosten op € 560.000,- per jaar. Dit komt overeen met € 4.600,- per kilometer snelweg per jaar.
- Bij optie 2 (privaat net) zijn de jaarkosten alleen op aanvraag te verkrijgen.
- 4.7 *Risico analyse* De volgende risico's worden gezien:
- Meer voertuigen per kilometer dan waar het voor ontworpen is;
 - Voeding optie 1: er is geen aansluiting mogelijk, omdat een gelijkrichterstation geen postcode heeft (een netbeheerder zal alleen een aansluiting realiseren als er een postcode bekend is);
 - Voeding optie 1: er is onvoldoende ruimte voor de vele kabels langs de weg;
 - Korte afstand tussen de voertuigen, o.a. filevorming, waardoor er lokaal overbelasting optreedt;

- De gevraagde 3500 kVA gelijkrichter is niet in 1 container te leveren, waardoor er 2 nodig zijn;
- De (container) gelijkrichterstations zijn niet ruimtelijk in te passen, bijvoorbeeld geen geschikte locatie met voldoende ruimte, ontsluiting vanaf de openbare weg (mag het vanaf de snelweg benaderd worden?), etc.
- Geen omgevingsvergunning;
- Er is geen vrije ruimte op het terrein of in het gebouw van het 150/50 kV station van de regionale netbeheerder;
- Er is geen transportcapaciteit beschikbaar voor een extra vermogensvraag op het achterliggende 150/50 kV net. Uitbreiding hiervan kan afhankelijk van de situatie vele jaren vergen. Dit kan een serieuze vertraging betekenen voor de uitrol van een ERS-OC netwerk.

4.7.1. Veiligheid

De veiligheidsaspecten zijn in principe niet anders dan bij een trolley, zoals in Arnhem. De belangrijkste gevaren zijn aanrijdgevaar tegen mast en een gebroken leiding op de weg.

Door bij iedere mast een geleiderail aan te brengen wordt het aanrijdgevaar geminimaliseerd. Als een draad van de bovenleiding op de grond komt, wordt het elektrisch evenwicht verstoord. De stroom gaat dan gedeeltelijk ook door de grond. In het gelijkrichter station wordt dat gedetecteerd en binnen milliseconden afgeschakeld.

4.7.2. Aanvullend

Uit de A15 case studie komt een onderlinge gelijkrichterstation afstand van 2 kilometer in de eindsituatie. In de onderlinge afstand zit wel enige marge (± 100 meter). Daarbinnen moet een locatie gevonden worden. Het liefst allen aan dezelfde zijde van de snelweg in verband met de hoogspanning kabels.

De vermogensverliezen in de bovenleiding zijn, zeker bij intensief gebruik, hoog. Deze verliezen kunnen als een toeslag op de kWh prijs of d.m.v. een kilometerheffing bij de vervoerder geïnt worden. Bij voorkeur wordt dit Europees afgestemd.

4.8 Conclusies

In dit hoofdstuk is de dimensionering van een ERS-OC systeem uitgewerkt, en zijn de daarbij behorende kosten bepaald. Uitgaande van een maximum aantal voertuigen met pantograaf van 4 per kilometer (bijvoorbeeld 2 voertuigen in elke richting), is vastgesteld dat de gewenste afstand tussen gelijkrichterstations 2 kilometer is.

Voor een uitwerking langs de A15 is een elektrisch traject bepaald van 121 kilometer. Om dit ERS-OC systeem te voeden zijn er twee mogelijkheden:

- 1) Het individueel aansluiten van de gelijkrichterstations door de regionaal netbeheerder (kosten ERS-OC 3,3 miljoen Euro/km – beide richtingen);
- 2) Een gesloten privaat net realiseren (kosten ERS-OC 3.1 miljoen Euro/km – beide richtingen).

Hoewel de laatste optie minder kosten met zich meebrengt, is de eerste optie beter schaalbaar. Deze schaalbaarheid is overigens beperkt. De bovenleiding kosten zelf zijn niet schaalbaar met het aantal rijdende voertuigen.

Een belangrijke bevinding betreft de slijtage van de bovenleiding. Indien er sprake zou zijn van een miljoen passages per jaar in beide richtingen langs een bovenleiding traject van 90 kilometer, dan zou dat resulteren in een jaarlijks verlies van koper van 30 ton. Geadviseerd wordt om nader te onderzoeken of de gemaakte aannames uit de spoorwereld ook van toepassing zijn op ERS-OC.

5 Kosten en baten

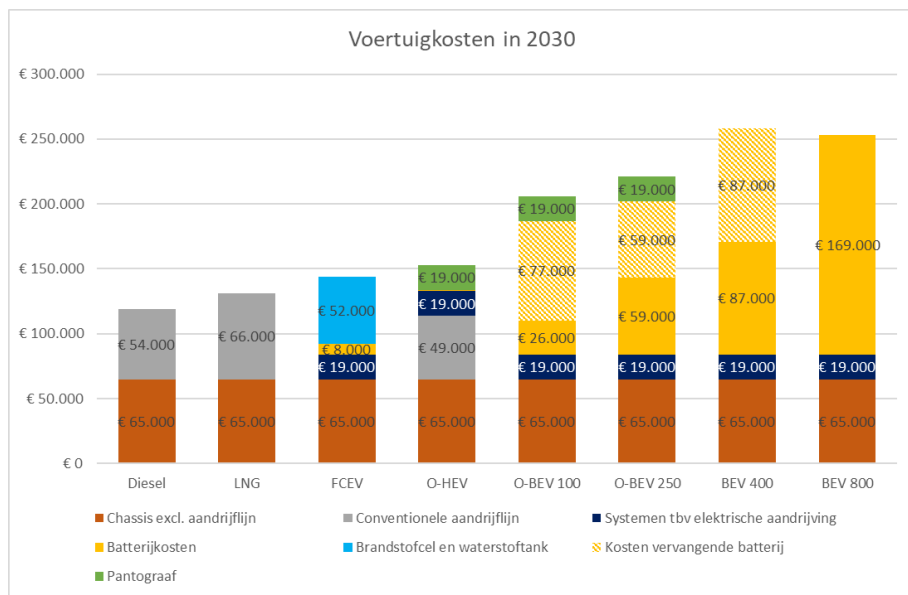
In dit hoofdstuk worden de kosten en baten berekend van zowel een bovenleiding exploitant als een transporteur. Eerst volgt een beschrijving van de voertuigkosten, de energiekosten en de ERS-OC investeringskosten. Op basis hiervan worden vervolgens de business case van de exploitant bepaald en de Total Cost of Ownership (TCO) van de transporteur.

5.1 Voertuigen

In hoofdstuk twee is reeds een beschrijving gegeven van de opbouw van de voertuig aanschafkosten van de verschillende aandrijfconcepten.

Voor de levensduur van een batterij wordt een aantal van 1250 volcycli aangehouden (zie hoofdstuk 2). Bij vervanging van de batterij is geen rekening gehouden met eventuele prijsdalingen gedurende de levensduur van het voertuig. Aan het eind van de levensduur van een voertuig blijken de batterijen voorbij 75% van hun eigen levensduur te zitten. Wij nemen aan dat deze batterijen geen restwaarde meer hebben.

Het volgende figuur toont de voertuigkosten (aanschaf en batterij vervanging) per aandrijfconcept in 2030 (prijspeil 2020). Zichtbaar zijn onder meer de grote invloed van de batterijkosten en de relatief lage meerprijs van een FCEV in 2030 ten opzichte van een diesel voertuig (zie ook paragraaf 2.4).



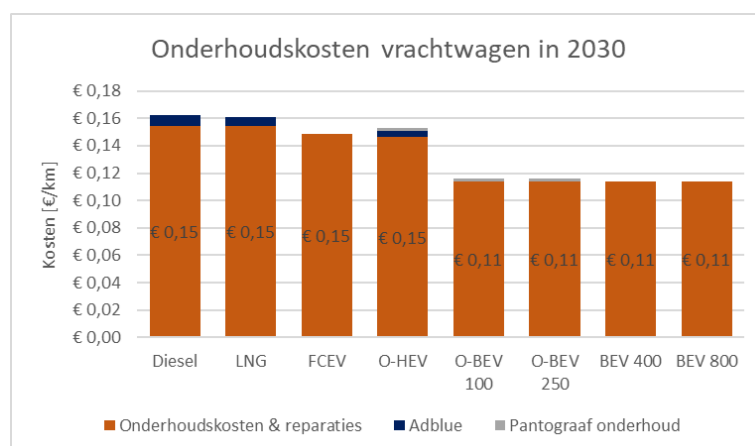
Figuur 5-1 Voertuigkosten (aanschaf en batterij vervanging)

5.1.1. Onderhoud

In deze paragraaf worden de gehanteerde onderhoudskosten beschreven per aandrijfconcept. De laagste onderhoudskosten worden gemaakt door de voertuigen met een elektrische aandrijving (BEV, O-BEV). Systemen met een verbrandingsmotor (diesel, LNG, O-HEV) kennen hogere onderhoudskosten. Onderhoudskosten van brandstofcelvoertuigen worden verwacht te dalen tot onder het niveau van de vrachtwagens met een verbrandingsmotor rond 2030.

Het volgende figuur geeft de gehanteerde onderhoudskosten weer (Kuhnel 2018). Hierin is het hierboven verschil in onderhoudskosten weergegeven. Tevens is zichtbaar:

- Voor dieselveertuigen is het gebruik van AdBlue als aparte post opgenomen. Voor LNG voertuigen wordt er vanuit gegaan dat het verbruik hiervan in 2030 80% van het verbruik van diesel voertuigen ligt.
- Voor de pantograaf worden de onderhoudskosten per 2030 ingeschat op € 200,- per jaar (1-2% investeringskosten).



Figuur 5-2 Onderhoudskosten per km in 2030 (prijspeil 2020)

5.1.2. Heffingen en belastingen

In deze paragraaf wordt ingegaan op de heffingen en belastingen op voertuigniveau. Heffingen en belastingen op energie staan verderop beschreven in dit hoofdstuk.

Binnen deze studie wordt uitgegaan van twee soorten heffingen of belastingen voor zwaar wegtransport: de vrachtwagenheffing en de motorrijtuigenbelasting.

- De beoogde vrachtwagenheffing (MinI&W 2019) betreft een heffing per gereden kilometer die betaald gaat worden door Nederlandse en buitenlandse vrachtwagens voor het gebruik van Nederlandse wegen. De motorrijtuigenbelasting voor vrachtwagens wordt verlaagd tot het Europees minimum en het Eurovignet verdwijnt in Nederland en maakt plaats voor de vrachtwagenheffing. De hoogte van de heffing is afhankelijk van het gewicht en de uitstoot van de vrachtwagen. Hoe schoner en lichter de vrachtwagen, hoe minder er moet worden betaald. De vrachtwagenheffing zal gelden op vrijwel alle snelwegen en, op basis van onderzoek en overleg met provincies, gemeenten en waterschappen, op een aantal N-wegen en gemeentelijke hoofdwegen. De invoering zal niet eerder dan 2024 plaatsvinden.
- De hoogte van de motorrijtuigenbelasting (MRB) is afhankelijk van het gewicht van het voertuig, de brandstof, hoe milieuvriendelijk het voertuig is, en de provincie waar het voertuig gevestigd is. In 2020 betalen voertuigen met een elektromotor of waterstofverbrandingsmotor geen MRB. Dit geldt niet voor diesel-

hybride voertuigen¹⁶. In deze rapportage wordt er vanuit gegaan dat in 2030 dit MRB onderscheid verdwenen is.

Aangezien batterij elektrische voertuigen aanzienlijk zwaarder kunnen zijn, en de vrachtwagenheffing onderscheid maakt in gewicht, resulteert dit in een hogere heffing voor met name de BEV 400 en BEV 800. In de tariefstelling wordt onderscheid gemaakt in de klassen 3,5-12 ton, 12-32 ton en meer dan 32 ton. In dit rapport wordt uitgegaan van gemiddeld gewicht van 29 ton en valt daarmee in de 2^e klasse, zie technische uitgangspunten in hoofdstuk 2. Aangenomen wordt dat 50% van de BEV 400 voertuigen stijgt naar een volgende klasse, en 80% van de BEV 800 voertuigen.

Verder is uitgegaan van de huidige situatie rond heffingen; met overige potentiële wijzigingen in de tarieven is geen rekening gehouden.

5.2 Energie en brandstof

Om te komen tot de energieprijzen per aandrijfconcept in 2030 is de prijsontwikkeling ingeschat van diesel, LNG, elektriciteit en waterstof.

- Onze aannames voor de grootverbruik dieselprijs zijn gebaseerd op studies van EVConsult uit 2019 en 2020. Hierin wordt gesteld dat deze prijs stijgt van € 1,05 per liter in 2020 tot € 1,55 per liter in 2030.
- De LNG prijs is gebaseerd op de huidige prijs aan de pomp (€ 0,849 per kg¹⁷). Om te komen tot een prijs voor 2030 wordt de voorziene prijsstijging van aardgas van 32% tot 2030 aangehouden (KEV2019). Dit resulteert in een LNG prijs per 2030 van € 1,117 per kg.
- De productiekosten van vloeibaar biomethaan (LBG) zijn momenteel aanzienlijk hoger dan van LNG (CE Delft 2018). De inzet van de geplande hernieuwbare brandstofeenheden (HBE) subsidie kan op termijn LBG die geproduceerd wordt vanuit verschillende grondstofstromen (e.g. mestvergisting) concurrerend maken. Gezien de voorziene lange termijn vraag naar biomethaan vanuit de woningbouw en industrie is beschikbaarheid van biomethaan voor transport onzeker en ons inziens zelfs twijfelachtig. Nader onderzoek is hier vereist.
- Voor de ontwikkeling van de groothandel elektriciteitsprijs wordt voor de periode 2020-2030 een stijging voorzien van € 43 per MWh in 2020 naar € 57 per MWh (KEV 2019). Inclusief marges, toeslagen en belastingen wordt uitgegaan van een grootverbruiker inkoopprijs per 2030 van € 67 per MWh.
- Om van de groothandel elektriciteitsprijs te komen tot een prijs voor elektriciteit bij laadstations is het nodig om aannames te doen t.a.v. afschrijving, exploitatiekosten van laadinfrastructuur (inclusief kosten netbeheerder) en marge. In deze studie wordt uitgegaan van een elektriciteitsprijs bij statisch laden door batterij elektrische zware voertuigen van € 163 per MWh (EVConsult 2020).
- Voor dynamisch laden wordt er in deze studie vanuit gegaan dat de elektriciteitsverliezen in de bovenleiding en de infrastructuurkosten worden doorbelast naar de afnemers van elektriciteit (dynamisch laden via de bovenleiding). Deze prijs wordt berekend in paragraaf 5.4.
- Voor de productie van waterstof wordt uitgegaan van on-site elektrolyse. De kosten hiervan in 2030 worden ingeschat op € 5,40 per kg (EVConsult 2019). Hierbij is aangenomen dat over deze brandstof geen belasting wordt geheven.

¹⁶https://www.belastingdienst.nl/wps/wcm/connect/bldcontentnl/belastingdienst/privé/auto_en_vervoer/belastingen_op_auto_en_motor/motorrijtuigenbelasting/hoeveel_motorrijtuigenbelasting_betaal_ik/motorrijtuigenbelasting_vrachtauto/ [bezocht op 12/11/2020]

¹⁷ <https://www.rolande.nl/lng-cng-prijs/> [bezocht op 16/11/2020]

Onderstaande tabel geeft deze energieprijzen weer in de eenheid €/kWh.

Tabel 5-1 Voorziene energiekosten per 2030

Energiedrager	Eenheid	Prijs in 2030
Diesel	[Euro/kWh]	0,158
LNG	[Euro/kWh]	0,082
Grootverbruik elektriciteit	[Euro/kWh]	0,067
Elektriciteit BEV	[Euro/kWh]	0,163
Waterstof (elektrolyse)	[Euro/kWh]	0,162

5.3 Infrastructuur

In hoofdstuk vier zijn de belangrijkste kostencomponenten geschetst voor aanleg en beheer van een ERS-OC infrastructuur.

- Voor aanleg wordt in deze studie een bedrag van 3,3 miljoen per kilometer snelweg gehanteerd. Dit is voor elektrificatie van beide richtingen.
- Voor beheer wordt een onderscheid gemaakt in de kosten voor vervanging van de bovenleiding, en overige periodieke kosten.
 - o Voor vervanging van de bovenleiding wordt een bedrag van 1,67 ct per gereden kilometer gehanteerd;
 - o Voor netbeheer kosten en overige periodieke kosten wordt een bedrag gehanteerd van € 10.600,- per kilometer snelweg per jaar (gezamenlijk voor beide richtingen).

Aandachtspunt bij elektrisch rijden is de belasting van het elektriciteitsnet bij gelijktijdig laden. In een studie van ElaadNL (ElaadNL 2020) wordt ingeschat dat 90% van de energievraag van batterij elektrische voertuigen wordt geladen op bestemming bij bedrijventerreinen. Hier bevindt zich in de regel voldoende netcapaciteit om zonder grote uitbreidingen deze voertuigen te kunnen laden. In de overige 10% wordt voorzien met laden onderweg. Hiervoor zullen net zoals bij ERS-OC laadfaciliteiten moeten worden aangelegd langs snelwegen. Wij gaan er vanuit dat de kosten hiervan zijn meegenomen in de elektriciteitsprijs zoals bepaald door EVConsult (EVConsult 2020).

De impact van zowel laden onderweg als ERS-OC op de landelijke vraag naar elektrisch vermogen wordt als inpasbaar ingeschat. Voor ERS-OC is een ruwe indicatie gemaakt van deze vermogensvraag. Uitgaande van een landelijk netwerk van 500 km, een maximum van 5 ladende voertuigen per kilometer per richting en een gemiddelde vermogensvraag van 200 kW per voertuig komen wij op een extra vermogensvraag overdag van 1 GW. Dit komt overeen met ruim 5% van de landelijke vermogensvraag. Nader onderzoek moet uitwijzen hoe deze netbelasting zich verhoudt tot mogelijke laadpatronen van (de merendeel 's nachts ladende) batterij elektrische voertuigen.

5.4 Kosten infrabeheerder

Voor de kostenberekening van de ERS-OC infrastructuur is de belangrijke aanname gedaan dat het hier een maatschappelijke investering betreft die kostenneutraal dient te zijn over een levensduur van 35 jaar. Inkomsten komen voort uit verkoop van elektriciteit aan afnemers, kosten betreffen de afschrijving van de aanlegkosten, onderhoud, de inkoop van elektriciteit en elektriciteitsverliezen. Voor de indexering van de onderhoudskosten, de indexering van de elektriciteitsprijs (inkoop en verkoop) en de discontovoet is bij allen uitgegaan van 2%.

Uitgaande van de dimensionering van de ERS-OC infrastructuur uit het vorige hoofdstuk is vervolgens bepaald welke elektriciteitsprijs aan de afnemers moet worden berekend om kostenneutraal te zijn. Daarbij is de prijspeil voor 2020 omgerekend naar een prijspeil voor 2030, de inflatie is hiervoor gesteld op 1,61%. Deze berekening is uitgevoerd voor een hoog scenario (jaarlijks 500.000 afnemers – o.a. de in hoofdstuk 3 geselecteerde wegdelen), een midden scenario (jaarlijks 250.000 afnemers) en een laag scenario (50.000 afnemers). De resultaten hiervan zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 5-2 ERS-OC verkoopprijs elektriciteit bij kostenneutrale investering

Scenario	Aantal afnemers per jaar	Vereiste verkoopprijs elektriciteit [€/kWh]
Hoog	500.000	0,200
Midden	250.000	0,315
Laag	50.000	1,235

Deze tabel toont dat in het hoog scenario de verkoopprijs ongeveer driemaal de gehanteerde grootverbruik inkooprijs betreft. Tweederde van de verkoopprijs wordt dus bepaald door de kosten voor de infrastructuur (o.a. investering, onderhoud, financiering). Deze prijs is hoger dan de gehanteerde prijs voor het stationair laden van elektrische voertuigen (EVConsult 2020). Dit suggereert dat de kosten voor infrastructuur en exploitatie bij stationair laden lager zijn dan bij ERS-OC. Nader onderzoek wordt aanbevolen.

5.5 Kosten transporteur

Om te komen tot de Total Cost of Ownership (TCO) van de transporteur combineren we de volgende kosten:

- Voertuig investering. Deze bestaat uit:
 - o Voertuigkosten (aanschaf en batterij vervanging)
 - o Financieringskosten (in totaal 9% van de aanschafprijs)
 - o Voor de restwaarde van het voertuig na acht jaar is uitgegaan van 10% van de aanschafprijs
- Bedrijfs- en onderhoudskosten
- Heffingen en belastingen
- Energiekosten

Onderstaande figuur geeft de TCO vergelijking per aandrijfconcept weer. Kosten zijn uitgedrukt in het prijspeil van 2020. Opvallend is hierin dat, met uitzondering van LNG, de TCO dicht bij elkaar liggen en variëren tussen 1,0 miljoen en 1,1 miljoen Euro.

Zoals eerder is aangegeven zijn er geen bruikbare inschattingen gevonden over eventuele beschikbaarheid van LBG voor transport. Net zoals de diesel kolom dient de LNG kolom in dit plaatje te worden beschouwd als een fossiele referentie.

Op basis van deze berekeningen is nog geen voorkeurstechologie aan te wijzen: verschillen liggen binnen de onzekerheidsmarges. Wel lijken alle varianten met een elektromotor in 2030 goedkoper dan diesel.



Figuur 5-3 Total Cost of Ownership transporteur [diesel en LNG o.b.v. prijzen fossiele brandstoffen, waterstof o.b.v. elektrolyse met elektriciteitsmix NL]

Tevens is voor het hoog scenario (electriciteitsprijs 20 ct/kWh) onderzocht wanneer een transporteur de meerinvestering in een ERS voertuig ten opzichte van het diesel alternatief terugverdiend heeft. Hierbij is gekeken naar de volgende varianten: O-HEV, O-BEV 100 en O-BEV 250. Dit blijkt voor alle drie de varianten na 4-5 jaar te zijn.

5.6 Werkgelegenheid

Een eerste literatuur indicatie (SRF 2020) suggereert 1,7 manjaar werk te genereren per te elektrificeren kilometer snelweg. Ter illustratie: realisatie van 500 km ERS-OC impliceert 850 manjaar werk. Werkzaamheden kunnen door Nederlandse aannemers (o.a. Volker Rail, BAM, Strukton) en ingenieursbureaus worden uitgevoerd.

5.7 Conclusies

In hoeverre kan de overheid haar klimaatdoelen waarmaken het behulp van ERS? ERS heeft veel overeenkomsten met de andere zero emissie-opties: batterij-elektrisch en waterstof-elektrisch vrachtvervoer. Ze kunnen alle drie significant bijdragen aan verduurzaming van het wegtransport. Ook geldt voor alle drie dat er wel voldoende materialen beschikbaar moeten zijn, die bij voorkeur circulair worden gebruikt. Daarom lijkt dit vraagstuk uiteindelijk economisch van aard: welk alternatief oogt het meest economisch aantrekkelijk voor overheid en marktpartijen?

De verschillende aandrijfconcepten zijn vergeleken op TCO. Deze bleken zeer dicht bij elkaar in de buurt te liggen (met uitzondering van het fossiele LNG – er is grote onzekerheid over de beschikbaarheid van het duurzame LBG als brandstof). Kosten blijken te variëren tussen 1,0 miljoen en 1,1 miljoen Euro.

Op basis van deze berekeningen is nog geen voorkeurstehnologie aan te wijzen: de verschillen liggen binnen de onzekerheidsmarges. Wel lijken alle varianten met een elektromotor in 2030 goedkoper dan diesel.

Via de verwachte voertuigheffingen zal er waarschijnlijk geld beschikbaar komen voor (aanschaf)subsidies voor batterij elektrische vrachtwagens en brandstofcel elektrische vrachtwagens. De TCO van deze voertuigen wordt door de invloed van deze subsidies vermoedelijk gunstiger ten opzichte van diesel- en LNG-vrachtwagens.

Inschattingen van voertuigkosten in 2030 variëren van bijna € 120.000 voor een diesel voertuig tot ruim € 250.000 voor een BEV 800. Onderhoudskosten per kilometer lopen uiteen van 16 cent voor diesel voertuigen tot 11 cent voor een BEV 400 of BEV 800. Verschillen in voertuigheffingen en -belastingen blijken beperkt. Het grotere gewicht van batterij elektrische voertuigen resulteert slechts in minimale verschillen.

Voor de kostenberekening van de ERS-OC infrastructuur is de belangrijke aanname gedaan dat het hier een maatschappelijke investering betreft die kostenneutraal dient te zijn over een levensduur van 35 jaar. Hiervoor is de verkoopprijs van elektriciteit bepaald die transporteurs dienen te betalen, uitgaande van een stabiel aantal afnemers na een periode van marktintroductie. Deze prijs blijkt te liggen op 20 ct per kWh. Bij deze prijs wordt de meerinvestering in het voertuig binnen de levensduur terugverdiend.

6 Conclusies en aanbevelingen

In deze studie is ingegaan op de vraag in hoeverre toepassing van ERS binnen het vrachtvervoer voor Nederland een aantrekkelijke optie is om bij te dragen aan het halen van de klimaatdoelstellingen.

6.1 Hoofdconclusie

Dynamisch laden met een bovenleiding (ERS-OC, OBEV) heeft, evenals de aandrijfconcepten BEV en FCEV, potentieel om bij te dragen aan de klimaatdoelstellingen van de Nederlandse overheid. Op dit moment zijn er echter te veel onzekerheden om een voorkeur voor één van deze concepten uit te kunnen spreken.

Met de volledige vergroening van de Nederlandse elektriciteitsmix worden ERS-OC, BEV en FCEV CO₂ neutraal (Well To Wheel). Uitgaande van waterstofproductie op basis van elektrolyse met de huidige elektriciteitsmix, zijn de CO₂-emissies van FCEV ruim tweemaal zo hoog als van ERS-OC en BEV. Luchtkwaliteitsaspecten spelen bij deze opties niet. Wel is er sprake van slijtage van de bovenleidingen van ERS-OC. Het perspectief van LNG om aan deze doelstellingen bij te dragen is onzeker gezien de onzekere beschikbaarheid van biomethaan (LBG) voor wegtransport. Belangrijke randvoorwaarde bij een uiteindelijke keuze betreft de beschikbaarheid van winbare grondstoffen (metalen) en de mate van circulariteit van ERS systemen, batterijen en brandstofcellen.

In hoeverre kan de overheid haar klimaatdoelen waarmaken het behulp van ERS? ERS heeft veel overeenkomsten met de andere zero emissie-opties: batterij-elektrisch en waterstof-elektrisch vrachtvervoer. Ze kunnen alle drie significant bijdragen aan verduurzaming van het wegtransport. Ook geldt voor alle drie dat er wel voldoende materialen beschikbaar moeten zijn, die bij voorkeur circulair worden gebruikt. Daarom lijkt dit vraagstuk uiteindelijk economisch van aard: welk alternatief oogt het meest economisch aantrekkelijk voor overheid en marktpartijen? Financieel gezien blijken de opties FCEV, OBEV, OBEV en BEV niet significant te verschillen: TCO kosten variëren tussen 1,0 miljoen en 1,1 miljoen Euro. Op basis van deze berekeningen is nog geen voorkeurst technologie aan te wijzen: de verschillen liggen binnen de onzekerheidsmarges. Wel lijken alle varianten met een elektromotor in 2030 goedkoper dan diesel.

6.2 Deelconclusie: milieu

Ten aanzien van CO₂-emissies en luchtkwaliteitsaspecten zijn de volgende conclusies te trekken:

- De CO₂-emissies (Well-to-Wheel) van OBEV en BEV voertuigen ontlopen elkaar niet sterk en worden bepaald door de CO₂-emissiefactor van de Nederlandse elektriciteitsmix. Gezien het huidige en voorziene Rijksbeleid t.a.v. de verduurzaming hiervan kan men aannemen dat deze emissies de komende decennia verwaarloosbaar klein zullen worden.
- Dit perspectief van verwaarloosbare CO₂-emissies geldt eveneens voor de productie van waterstof door middel van elektrolyse, met de kanttekening dat deze keten minder efficiënt is. Door de lagere efficiëntie van de brandstofcel en de productie van waterstof middels elektrolyse wordt er per gereden kilometer 2,3 tot 2,4 maal zoveel CO₂ uitgestoten door een FCEV als door een OBEV of BEV. Hierbij is uitgegaan van elektrolyse met elektriciteit uit het Nederlands elektriciteitsnet.

- Het verduurzamingspotentieel van LNG is momenteel onbekend. Gezien de beperkte beschikbaarheid van biomethaan en de voorziene vraag hiernaar vanuit de woningbouw en industrie ('aardgasvrij') achten wij beschikbaarheid van deze brandstof voor de transportsector twijfelachtig. Nader onderzoek is hier vereist.
- Voertuigen met een elektromotor (FCEV, OBEV, BEV) kennen geen uitstoot van fijnstof of NOx vanuit de aandrijving zelf. Wel is er sprake bij OBEV van slijtage van de bovenleiding. Dit betreft deeltjes die aanzienlijk groter zijn dan de deeltjes die vrijkomen in een verbrandingsproces. Nader onderzoek moet uitwijzen wat de bijdrage hiervan is aan fijnstofuitstoot.

6.3 Aandachtspunt:
circulariteit

Hoewel het buiten de scope van dit onderzoek valt, signaleren wij het belang bij een eventuele systeemkeuze van de beschikbaarheid van winbare grondstoffen (metalen) en de mate van circulariteit van ERS systemen, batterijen en brandstofcellen. Ons inziens dient bij de keuze voor een aandrijfconcept er een redelijke waarschijnlijkheid te zijn dat het beoogde concept zonder winning van schaarse grondstoffen kan bestaan.

6.4 Deelconclusie:
kosten en baten

In hoeverre kan de overheid haar klimaatdoelen waarmaken het behulp van ERS? ERS heeft veel overeenkomsten met de andere zero emissie-opties: batterij-elektrisch en waterstof-elektrisch vrachtvervoer. Ze kunnen alle drie significant bijdragen aan verduurzaming van het wegtransport. Ook geldt voor alle drie dat er wel voldoende materialen beschikbaar moeten zijn, die bij voorkeur circulair worden gebruikt. Daarom lijkt dit vraagstuk uiteindelijk economisch van aard: welk alternatief oogt het meest economisch aantrekkelijk voor overheid en marktpartijen? Binnen dit kader blijken de opties FCEV, OBEV, OBEV en BEV niet significant te verschillen: kosten variëren tussen 1,0 miljoen en 1,1 miljoen Euro. Op basis van deze berekeningen is nog geen voorkeurstechologie aan te wijzen: de verschillen liggen binnen de onzekerheidsmarges. Wel lijken alle varianten met een elektromotor in 2030 goedkoper dan diesel.

6.5 Onzekerheden

In dit onderzoek zijn een groot aantal onzekerheden naar boven gekomen, die het nu onmogelijk maken om een voorkeursvariant aan te wijzen. Onzekerheden in kosten van energie, infrastructuur en voertuigen kunnen bovenstaande bevindingen sterk wijzigen. Specifiek zijn de volgende onzekerheden te benoemen:

Energiekosten

- Kosten en beschikbaarheid voor transport van LBG. Bij gebleken beschikbaarheid van LBG kan LNG/LBG nader in de vergelijking worden meegenomen;
- Kosten voor stationair laden. Momenteel is hier één literatuurbron voor gevonden en zijn de achterliggende aannames ten aanzien van de genoemde elektriciteitsprijs en de business case van stationair laden van vrachtwagens onbekend;
- Kosten voor dynamisch laden met ERS-OC. Deze zijn deels afhankelijk van het marktmodel, en deels van de kosten van aanleg en beheer. Wat betreft dit laatste blijken de bevindingen van Movares te verschillen van andere studies. Aanbevolen wordt een gedetailleerde haalbaarheidsstudie uit te voeren t.a.v. aanleg, beheer, marktuitrol en marktmodel van ERS-OC. Specifiek hierbinnen zijn te benoemen:
 - o Hoewel ERS-OC momenteel het meest marktrijp oogt van de verschillende ERS-concepten, zijn er nog volop ontwikkelingen. Aanbevolen wordt om in samenwerking met Europese overheden (koplopers Zweden en Duitsland) meer inzicht te krijgen in de uitdagingen en het potentieel van ERS-concepten gebaseerd op rail en inductie;

- Aanlegkosten per kilometer bovenleiding. Movares komt tot hogere kosten voor de bovenleiding plus masten dan eerdere literatuurstudies. Nader onderzoek wordt aanbevolen naar de daadwerkelijke kosten in Zweedse en Duitse pilots, en de inschattingen van betrokkenen (overheden, leveranciers, kennisinstututen) naar de ontwikkeling van deze kosten;
- Voor de elektrische voeding van ERS-OC systemen bieden gesloten private netten kansen om kosten te reduceren. Nader onderzoek is hier vereist naar de technische, financiële en juridische aspecten hiervan in relatie tot de opschaalbaarheid van een ERS-OC systeem;
- Marktuitrol: meer inzicht is vereist ten aanzien van ERS ontwikkelingen in buurlanden. Tevens wordt geadviseerd om, gezien het internationale karakter van wegtransport, internationaal af te stemmen ten aanzien van marktintroductie strategieën;
- Vervoerders: voor de categorie trekkers met oplegger is meer inzicht vereist ten aanzien van aantallen (jaarvolume en piek), nationale en internationale bestemmingen, en perceptie van de doelgroep zelf. Dergelijke informatie staat aan de basis van een eventuele marktintroductie;
- Financiering. In deze studie is uitgegaan van financiële parameters passend bij een maatschappelijke voorziening zonder winstoogmerk. Afhankelijk van de mate en vorm van overheidsbetrokkenheid dient hier een nadere inschatting te worden gemaakt, en dient opnieuw de elektriciteitsprijs voor de transporteur te worden bepaald;
- Kostenontwikkeling waterstof uit elektrolyse. Ook hier is één literatuurbron voor gevonden, en zijn de achterliggende aannames ten aanzien van de business case van waterstof productie onbekend;

Voertuigkosten

- Batterijontwikkelingen: batterijkosten (aanschafkosten, levensduur en restwaarde) bepalen tot meer dan 15% van de TCO kosten. Onderzoek naar de ontwikkelingen hiervan tot 2030 is vereist;
- Brandstofcel: energiekosten bepalen 45% van de TCO kosten van een brandstofcel voertuig. De ontwikkeling van de efficiëntie van de brandstofcel verdient nader onderzoek.

Invloed op het landschap

ERS met bovenleiding heeft landschappelijke gevolgen vanwege de bovenleidingen en gelijkrichterstations. Het landschappelijke aspect behoeft daarom nog aandacht in vervolgonderzoek.

6.6 Tot slot

In Zweden wordt eind 2020 of begin 2021 de uitslag verwacht van een tender rond een ERS systeem van 20-30 km. Geadviseerd wordt om in contact te treden met de Zweedse overheid om gedetailleerd te worden meegenomen in hun overwegingen rond deze tender.

Literatuurlijst

- Adolf (2017). Shell Wasserstoff-Studie – Energie der Zukunft?
- CE Delft (2018). Verkenning bioLNG transport
- Delgado (2018). Fuel Efficiency Technology in European Heavy-Duty Vehicles. ICCT
- ElaadNL (2020). Outlook E-trucks internationale logistiek
- EVConsult (2019). E-trucks vanuit de Rotterdamse haven
- Few (2018). Prospective improvements in cost and cycle life of off-grid lithium-ion battery packs. Energy Policy
- Gustavsson (2019). Overview of ERS concepts and complementary technologies
- Hacker (2020). StratON - Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge
- Harmelink (2012). Notitie Energie CO₂ effecten elektriciteit
- Hoekstra (2019). The Underestimated Potential of Battery Electric Vehicles to Reduce Emissions. Joule
- JRC (2020). JEC Well-To-Wheels report v5
- Klimaatakkoord (2019)
- Kuhnel (2018). Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr
- Lindgren (2018). Strategic Roadmap for Electric Road System
- Mareev (2018). Analyse und Bewertung von batteriegetriebenen, oberleitungsversorgten und brennstoffzellengetriebenen Lastkraftwagen für den Einsatz im Güterfernverkehr in Deutschland
- Meszler (2018). European heavy-duty vehicles
- MinEZ (2020). Kabinetsvisie waterstof
- MinI&W (2019). Conceptwetsvoorstel vrachtwagenheffing
- MinI&W (2020). Visie Duurzame energiedragers in mobiliteit
- Moultak (2017). Transitioning to zero-emission heavy duty freight vehicles. ICCT
- NKL (2020). Handreiking snelladen
- Panteia (2018). Kostencomputaties in het beroepsgoederenvervoer over de weg
- PBL (2019). Klimaat- en energieverkenning 2019
- PBL (2020). Conceptadvies SDE++ 2021 Waterstofproductie via elektrolyse

SRF (2020). Decarbonising the UK's Long-Haul Road Freight at Minimum Economic Cost

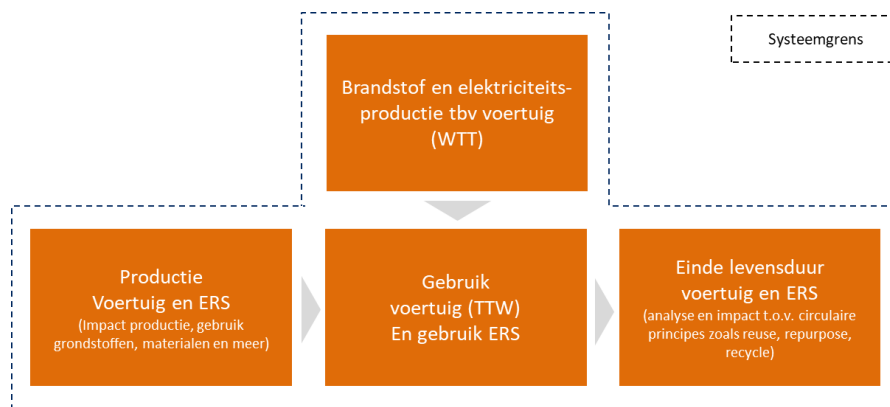
RVO (2020). Statistics Electric Vehicles and Charging in The Netherlands

Thielmann (2017). Energiespeicher-Roadmap-Dezember-2017. Fraunhofer ISI

Wietschel (2017). Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw

Bijlage Levenscyclus aspecten

Om een inschatting te kunnen maken van de levenscyclus emissies van een ERS-OC systeem verdient het aanbeveling om een LCA uit te voeren. Een versimpelde weergave van de verschillende onderdelen en analyses in een LCA is hieronder, voor zowel vrachtovervoer als het ERS-OC systeem, gecombineerd weergegeven.



Figuur 4 Onderdelen van een LCA analyse, gecombineerd voor voertuig en ERS systeem

Bij het ERS-OC systeem zijn 3 componenten te onderscheiden:

- Middenspanning en voedingskabels;
- Gelijkrichters stations;
- Bovenleiding: draden (incl. vervanging van rijdraden), masten, fundatie.

Om de impact van het ERS systeem over de gehele levensduur te bepalen dienen voor de gebruikte materialen in deze componenten, voor alle fases in een project (van productie, gebruik, onderhoud & vervanging van rijdraden en uiteindelijk sloop), de milieueffecten te worden berekend. De Milieu Kosten Indicator (MKI)¹⁸ is een analysemethode die hiervoor kan worden gebruikt. Een MKI berekening wordt gebaseerd op materiaalstromen en hoeveelheden, en drukt de milieu-impact van een product uit in Euro's.

Een MKI geeft tevens inzicht in afvalstromen en vrijkomende materialen, zoals wat er met de ERS-OC componenten en materialen gebeurt bij het einde van de levensduur. Ofwel: waar gaan er kostbare grondstoffen, producten en materialen verloren, of waar kunnen zij worden teruggewonnen. Aan de hand van de MKI berekening, de kringloopvisie van de Ellen MacArthur Foundation¹⁹ en het 10-R model²⁰ kunnen mogelijkheden worden geïdentificeerd om milieu-impact van het ERS-OC systeem te verbeteren en de kringloop zover mogelijk te sluiten. Denk hierbij aan herontwerp

¹⁸De Milieu Kosten Indicator wordt berekend op basis van *Environmental Product Declarations*, onafhankelijk getoetste data over de duurzaamheidsimpact van materialen en onderliggende processen, die opgenomen zijn in de Nationale Milieu Database en met software DuboCalc berekend wordt.

¹⁹Zie [Circular Economy System Diagram via ellenmacarthurfoundation.org](https://www.ellenmacarthurfoundation.org)

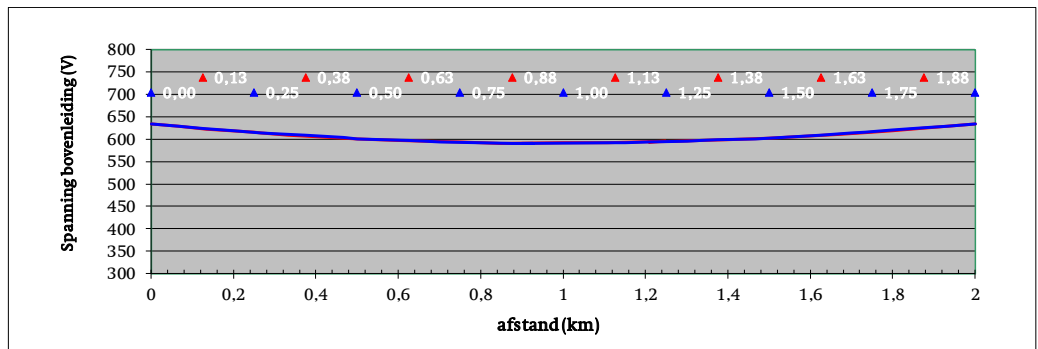
²⁰ 10 R-model van Jacqueline Cramer

zodat materiaalgebruik wordt verminderd (redesign), volledig hergebruik van componenten (reuse) of recycling van materialen.

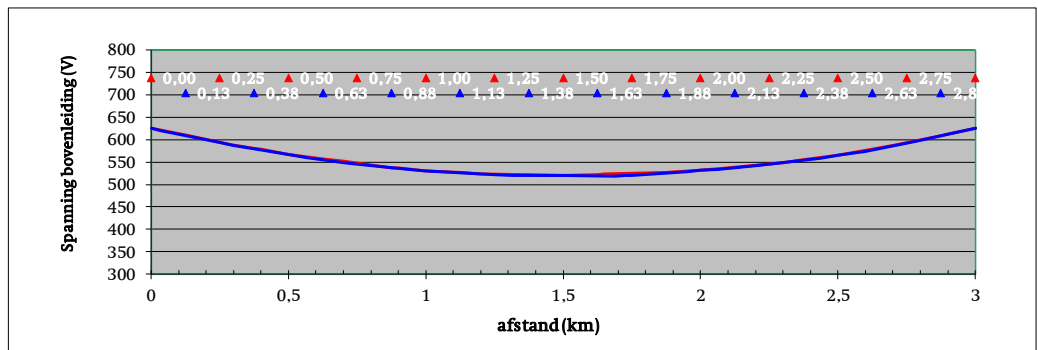
Een belangrijk aandachtspunt bij de LCA analyse voor het ERS-OC systeem is het gebruik van (ruwe) grondstoffen en metalen zoals koper. De kopervoorraden in de wereld zijn eindig. De bovenleiding bestaat deels uit koper en door slijtage van de bovenleiding komt koper vrij. Deze koperemissie heeft mogelijk schadelijke ecologische en gezondheidseffecten voor de nabije omgeving tot gevolg. Daarnaast zorgt dit voor verlies van schaars koper omdat dit koper niet kan worden teruggewonnen. Beide effecten verdienen extra aandacht.

Bijlage Tussenafstand gelijkrichterstations

De volgende drie grafieken laten het spanningsverloop zien op de bovenleiding bij verschillende afstanden tussen de gelijkrichterstations bij een trekker vermogensvraag van 110 kW en 4 voertuigen per kilometer totaal. Zichtbaar is onder meer hoe spanning halverwege daalt naarmate de gelijkrichterstations (GS) verder uit elkaar liggen.

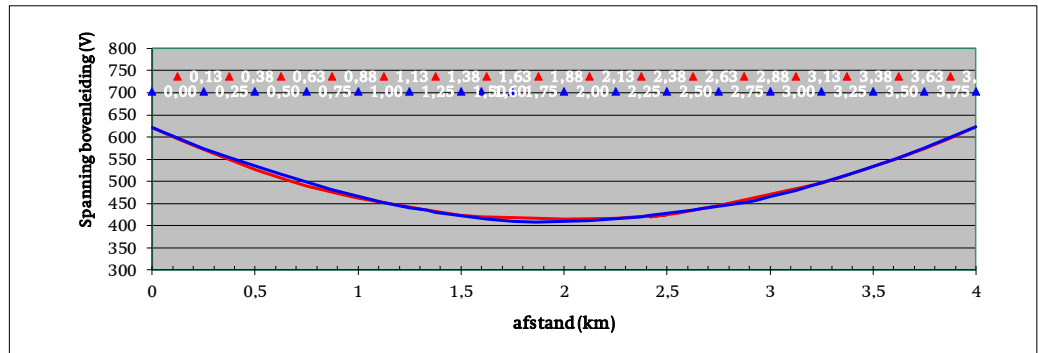


Figuur 1 Spanningsverloop bij tussenafstand GS = 2 km



Figuur 2 Spanningsverloop bij tussenafstand GS = 3 km

Bij een tussenafstand van 4 kilometer dreigt de spanning onder het minimum van 400 V te komen. Om dat te voorkomen moeten de voertuigen worden begrensd: zij kunnen dan gemiddeld maar 95 kW ontvangen (stroombegrenzing tot 200 A). Om de snelheid te handhaven op 80 km/uur zal de batterij 15 kW moeten leveren.



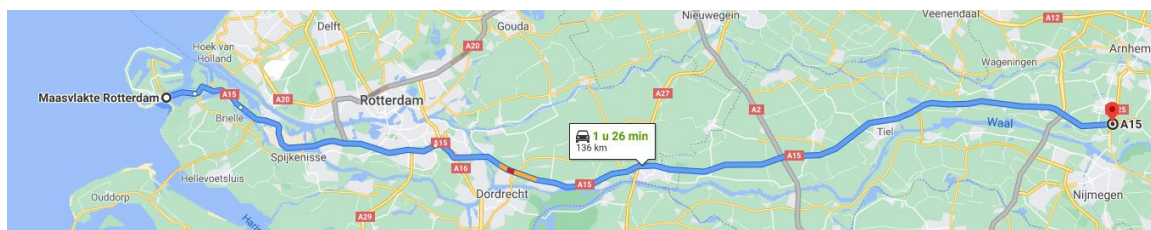
Figuur 3 Spanningsverloop bij tussenafstand GS = 4 km: afname 200 A

Indien voertuigen ook hun batterij moeten opladen, is een tussenafstand van 2 km tussen de gelijkrichterstations vereist. De maximale bovenleiding stroom van 1500 A wordt bereikt bij een voertuigstroom van 300 A. Dat komt overeen met een afgenomen vermogen tussen 190 en 167 kW, afhankelijk van de positie t.o.v. het gelijkrichterstation. Het gemiddelde is 178 kW wat overeenkomt met 2,2 kWh/km. Het verschil tussen 178 en 110 kW kan gebruikt worden om de batterij op te laden gedurende de rit. Dat betekent dat voor iedere 10 km gereden het voertuig minimaal 6 km actieradius kan opladen. Bij een lagere voertuigbelasting is het beschikbare vermogen per voertuig uiteraard hoger.

Soms rijden voertuigen in clusters. Het is niet onwaarschijnlijk dat in dergelijke situaties de voertuigen stroombegeerd worden om de minimale spanning te kunnen handhaven. Zo zal in het geval van drie clusters van 4 voertuigen de stroom begeerd worden tot 100 A per voertuig. Het gemiddelde afgenomen vermogen daalt dan tot gemiddeld 71 kW. De batterij zal dan 39 kW moeten leveren om de snelheid te kunnen handhaven.

Bijlage Trajectstudie A15

Als case studie wordt het A15 traject tussen Maasvlakte (C2 bocht) en Knooppunt Ressen/Bemmel geëlektrificeerd. Het traject is (afgerond) 136 km lang.



Afbeelding 4.10 Beschouwde A15 traject [Maps]

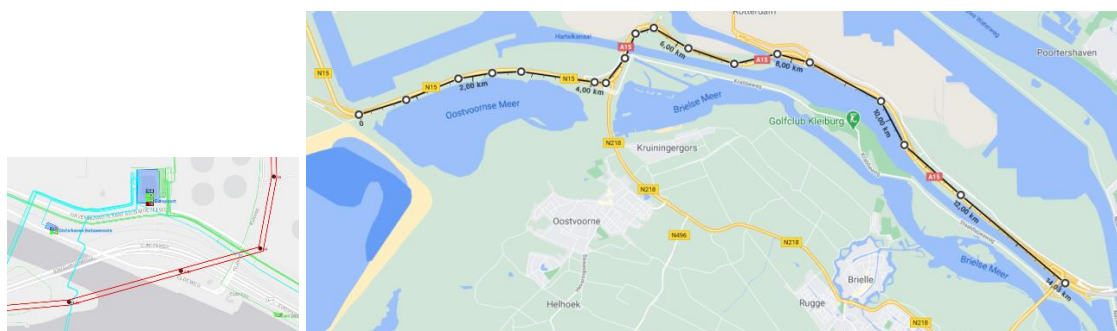
Het is niet zinvol om overal bovenleiding aan te brengen. Uitzonderingen worden gemaakt voor de tunnels (Calandkanaal, Botlek en de Noord) en het gedeelte van het gemeenschappelijke traject met de A16. Voor de toerit tot een tunnel is een lengte van 500 meter aangehouden. Dat komt overeen met een helling van maximaal 6% (tunnel Noord).

Voor de energie-afname wordt uitgegaan van 1,3 kWh/km per voertuig. De vermogensvraag is dan 104 kW. Het aantal voertuigen per rijrichting is 5000 per dag.

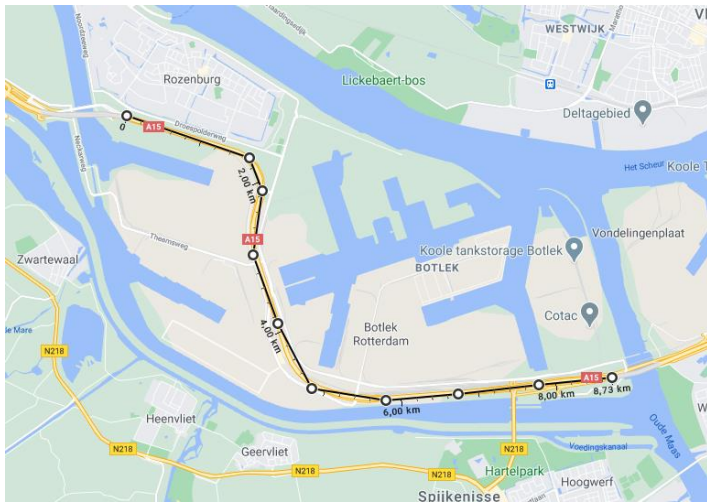
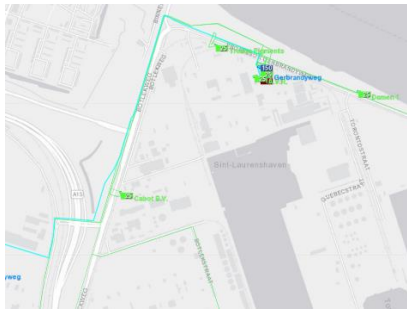
Een dergelijke grote energievraag moet uit een 50 of 150 kV station van de regionale netbeheerder of TenneT betrokken worden.

De stations die in aanmerking komen zijn:

1. 150/25/23/10 kV Europoort
 - Afstand tussen het station en de A15 is 250 meter. Er zit wel een spoorbaan tussen;
 - De te voeden bovenleiding loopt van Maasvlakte (C2 bocht) tot tunnel Calandkanaal en is \approx 14 kilometer lang.
 - Aantal gelijkrichterstations: 8

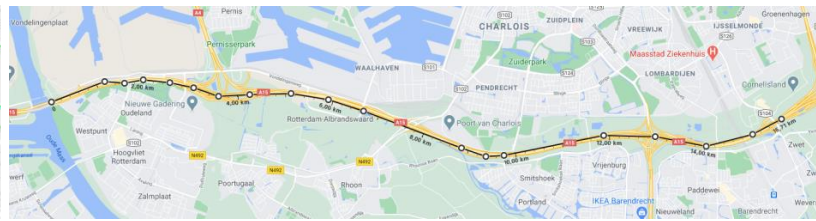
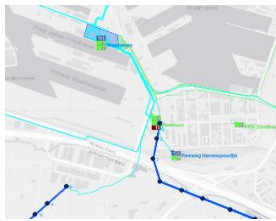


2. 150/25/20 Gerbrandyweg
 - Afstand tussen het station en de A15 is \approx 1800 meter
 - De te voeden bovenleiding loopt van tunnel Caland tot tunnel Botlek. Een afstand van \approx 8 km.
 - Aantal gelijkrichterstations: 5



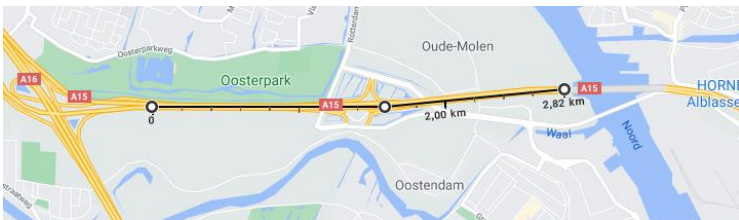
3. 150/25/23 kV Waalhaven

- Afstand tussen het station en A15 is ≈ 2 kilometer
- De te voeden bovenleiding loopt van tunnel Botlek tot knooppunt Rotterdam IJsselmonde. Een afstand van ≈ 15 kilometer
- Aantal gelijkrichterstations: 8



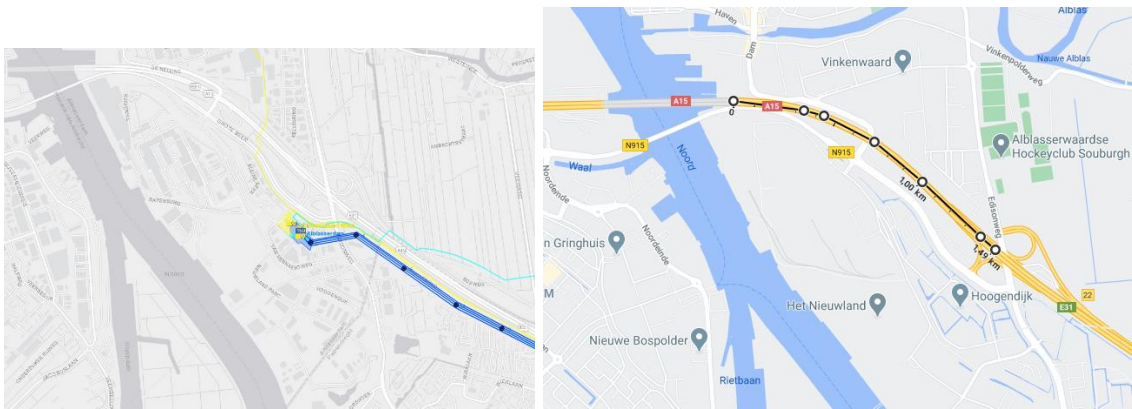
4. 50/13 kV Ridderkerk

- afstand tussen het station en A15 is ≈ 3 kilometer
- De te voeden bovenleiding loopt van knooppunt Rotterdam-Zuid tot de tunnel onder de Noord. Een afstand van 3 kilometer
- Aantal gelijkrichterstations: 2
- N.B.
- Een optie is om dit stuk niet van bovenleiding te voorzien



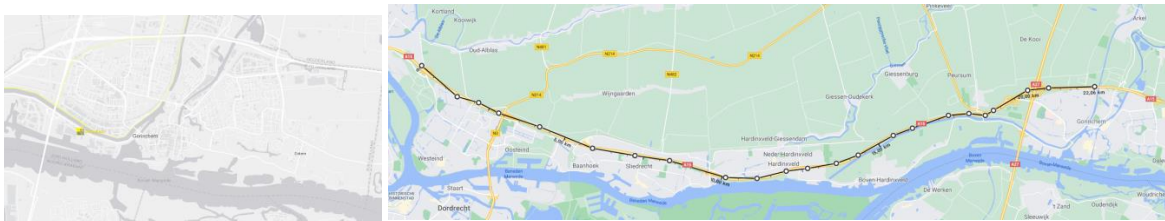
5. 150/50/13 kV Alblasterdam

- het station ligt vrijwel direct naast de A15
- De te voeden bovenleiding loopt van de tunnel onder de Noord tot halverwege Gorinchem. Een afstand van ≈ 11 kilometer
- Aantal gelijkrichterstations: 6



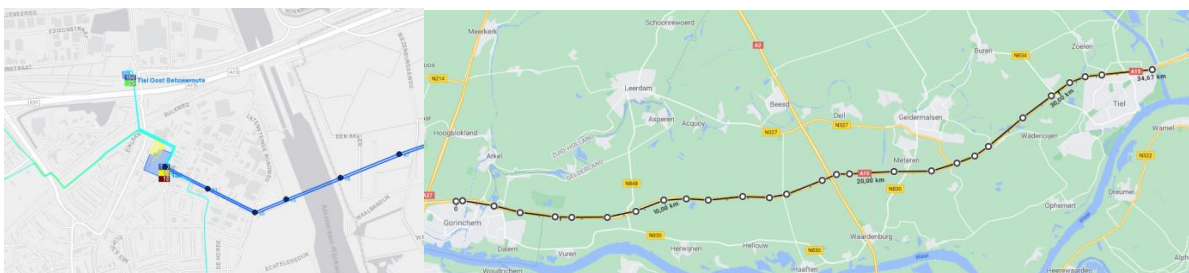
6. 50/13 kV Gorinchem

- De afstand tussen het station en A15 is ≈ 2 kilometer
- De te voeden bovenleiding loopt van halverwege Alblasserdam tot halverwege Tiel. Een afstand van ≈ 28 kilometer
- Aantal gelijkrichterstations: 14



7. 150/50/10 kV Tiel

- Het station ligt vrijwel direct naast de A15
- De te voeden bovenleiding loopt van halverwege Gorinchem tot halverwege Dodewaard. Een afstand van ≈ 24 kilometer
- Aantal gelijkrichterstations: 13



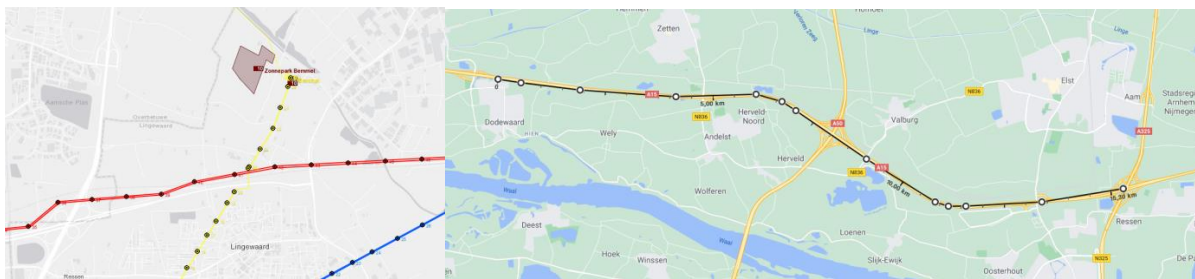
8. 380/150/50/10 kV Dodewaard

- Het station ligt vrijwel direct naast de A15
- Afstand tussen Tiel en Dodewaard is ≈ 15 kilometer
- De te voeden bovenleiding loopt van halverwege Tiel tot halverwege Bemmelen. Een afstand van ≈ 14 kilometer
- Aantal gelijkrichterstations: 6



9. 50/10 kV Bommel

- De afstand tussen het station en A15 (knooppunt A325) is ≈ 3 kilometer
- De te voeden bovenleiding loopt van halverwege Dodewaard tot knooppunt Ressen/Bemmel. Een afstand van ≈ 7 kilometer
- Aantal gelijkrichterstations: 4



De infrastructuur van voor de elektrificatie van de A15 bestaat uit 8 voeding secties.

Voedingssectie	Afstand station-A15 [m]	Voeding lengte bovenleiding [km]	Aantal gelijkrichterstations
Europoort	250	14	8
Gerbrandyweg	1800	8	5
Waalhaven	2000	15	8
Alblasserdam	250	11	6
Gorinchem	2000	28	14
Tiel	250	24	13
Dodewaard	250	14	6
Bemmel	3000	7	4

De resultaten zijn:

- Kilometer bovenleiding: 121 (per rijbaan, exclusief het gedeelte bij Ridderkerk);
- Aantal gelijkrichterstations: 64;
- Kortste middenspanning kabel: 250 m;
- Gemiddelde lengte middenspanning kabel: 6436 m;
- Maximale lengte middenspanning kabel: 18700 m.

Europoort	GS km	Lengte langs A15	kabel lengte naar station	Totaal
1	0	6000	250	6250
2	2000	4000	250	4250
3	4000	2000	250	2250
4	6000	0	250	250
5	8000	-2000	250	2250
6	10000	-4000	250	4250
7	12000	-6000	250	6250
8	14000	-8000	250	8250
Gerbrandyweg	GS km	Lengte langs A15	kabel lengte naar station	Totaal
9	16000	1000	1800	2800
10	18000	1000	1800	2800
11	20000	3000	1800	4800
12	22000	5000	1800	6800
13	24000	7000	1800	8800
Waalhaven	GS km	Lengte langs A15	kabel lengte naar station	Totaal
14	25000	6400	2000	8400
15	27000	4400	2000	6400
16	29000	2400	2000	4400
17	31000	400	2000	2400
18	33000	-1600	2000	3600
19	35000	-3600	2000	5600
20	37000	-5600	2000	7600
21	39000	-7600	2000	9600
A15	GS km	Lengte langs A15	kabel lengte naar station	Totaal
22	48700	1300	250	1550
23	50700	700	250	950
24	52700	2700	250	2950
25	54700	4700	250	4950
26	56700	6700	250	6950
27	58700	8700	250	8950
28	60700	9300	2000	11300
29	62700	7300	2000	9300
30	64700	5300	2000	7300
31	66700	3300	2000	5300
32	68700	1300	2000	3300
33	70700	700	2000	2700
34	72700	2700	2000	4700
35	74700	4700	2000	6700
36	76700	6700	2000	8700
37	78700	8700	2000	10700
38	80700	10700	2000	12700
39	82700	12700	2000	14700
40	84700	14700	2000	16700
41	86700	16700	2000	18700
42	88700	17300	250	17550
43	90700	15300	250	15550
44	92700	13300	250	13550
45	94700	11300	250	11550
46	96700	9300	250	9550
47	98700	7300	250	7550
48	100700	5300	250	5550
49	102700	3300	250	3550
50	104700	1300	250	1550
51	106700	700	250	950
52	108700	2700	250	2950
53	110700	4700	250	4950
54	112700	6700	250	6950
55	114700	6300	250	6550
56	116700	4300	250	4550
57	118700	2300	250	2550
58	120700	300	250	550
59	122700	1700	250	1950
60	124700	3700	250	3950
61	126700	5700	3000	8700
62	128700	3300	3000	6300
63	130700	1300	3000	4300
64	132700	700	3000	3700
			Maximale lengte kabel	18700
			Gemiddelde kabellengte	6436,71875
			Minimale lengte kabel	250

Colofon

Opdrachtgever Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Contact

Opgesteld door Menno Chang, Lisanne Labrujere, Marco Duijnisveld en Hans Minkman

Contact

Uitgave Movares Nederland B.V.

Daalseplein 100
Postbus 2855
3500 GW Utrecht

Telefoon 030 265 55 55

Projectnummer MN001657

Kenmerk AE-EN-EN-32T0000002

© 2020, Movares Nederland B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vervoelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Movares Nederland B.V.