

DE TRANSITIE NAAR ELEKTRISCH VRACHTTRANSPORT – VAN TCO NAAR STRATEGISCH VLOOTBEHEER

Jasper Bakker Rijksuniversiteit Groningen

Paul Buijs Rijksuniversiteit Groningen

Samenvatting

De logistieke sector staat op een keerpunt. Elektrische vrachtwagens bieden een veelbelovende route naar verduurzaming. Recente onderzoeken tonen aan dat de Total Cost of Ownership (TCO) van elektrische vrachtwagens steeds concurrerender wordt met die van dieselloertrugen, dankzij beleidsmaatregelen, dalende batterijprijzen en schaalvoordelen in de productie. Toch vraagt de transitie naar elektrische vrachtwagens meer dan alleen een gunstige TCO. Logistieke bedrijven moeten investeren in laadinfrastructuur en netverzwaring om depot-laden mogelijk te maken. Daarnaast heeft de vlootsamenstelling impact op operationele processen, financiële structuren en duurzaamheidsdoelstellingen. Een succesvolle transitie vereist daarom een geïntegreerde benadering van vlootmanagement, waarbij deze factoren zorgvuldig worden afgewogen. In dit paper bestuderen we de lange termijn investeringsbeslissingen voor een vloot met elektrische vrachtwagens, om inzicht te krijgen in hun potentieel en de bijbehorende operationele, financiële en duurzaamheidsgevolgen.

1. Introductie

De transportsector was verantwoordelijk voor ongeveer 23% van de totale CO₂ emissies wereldwijd in 2023 (ITF, 2023), hetgeen het belang van de sector onderstreept in het behalen van klimaatdoelen uit het akkoord van Parijs en de Nederlandse klimaatwet. Het behalen van deze doelen vereist een fundamentele verandering van transportbedrijven, bijvoorbeeld het inwisselen van conventionele dieselvrachtwagens naar schonere alternatieven zoals batterij-elektrisch of waterstof-cel aangedreven vrachtwagens (Mulholland et al., 2018).

Om deze transitie aan te jagen hebben Europese Unie en de Nederlandse Overheid verschillende beleidsmaatregelen ingevoerd. Als onderdeel van de EU Green Deal, bijvoorbeeld, worden vrachtautofabrikanten gemaand tot het reduceren van de CO₂ emissies van nieuwe voertuigen, is bepaald dat EU-landen een dekkend netwerk van publieke snelladers moeten aanleggen en wordt een nieuw emissie-handel system opgetuigd, ETS 2, dat onder andere wegtransport omvat. Daarnaast gaan in Nederland beleidsmaatregelen intreden zoals zero-emissie zones, de vrachtwagenheffing en zijn er subsidies beschikbaar voor de aanschaf van zero-emissie vrachtwagens (AanZET) en voor laadinfrastructuur bij bedrijven (SPRILA).

Op de korte termijn is de batterij-elektrische vrachtwagen (BEV) het alternatief met de meeste marktpotentie onder de zero-emissie vrachtwagens. De totale CO₂ emissies van een BEV over de gehele levenscyclus – van productie tot ontmanteling – is substantieel lager dan die van een diesel vrachtwagen (ICEV), zeker als de elektriciteit met hernieuwbare energiebronnen wordt opgewekt (Gunawan & Monaghan, 2022). Daarnaast is de Total Cost of Ownership (TCO) van een BEV in sommige gevallen lager dan ICEVs, en in andere gevallen zijn de projecties dat BEVs kostenpariteit bereiken in de komende jaren als het gevolg van beleid, dalende batterij prijzen en schaalvoordelen bij de productie van BEVs (Link et al., 2024; Noll et al., 2022).

Het is echter onvoldoende om alleen een TCO vergelijking te maken tussen verschillende alternatieve vrachtwagens. De transitie naar een andere vorm van transport vraagt een meer strategische benadering, waarin de verschillende voor- en nadelen van BEVs worden gewogen. Een van de belangrijkste uitdagingen van elektrische vrachtwagens, bijvoorbeeld, is de beperkte actieradius en de noodzaak om de batterij op te laden (Sugihara et al., 2023). Om de operationele impact te beperken hebben veel transportbedrijven de voorkeur voor 's nachts opladen, wanneer de vrachtwagens gestationeerd zijn op het depot. Dit vergt echter forse investeringen in laadinfrastructuur en een vergroting van de netaansluiting, om aan de hogere elektriciteitsvraag te voldoen.

De opkomst van de elektrische vrachtwagen compliceert daarmee de toekomstige vlootplanning van transportbedrijven. Vlootmanagers moeten een vergelijking maken tussen elektrische- en diesel vrachtwagens, begrijpen wat de implicaties van de toekomstige vloot zijn voor de operationele planning en zorgen voor laadinfrastructuur en netaansluitingen voor depot laden. Daarnaast is er een aantal externe factoren die deze keuzes beïnvloeden. Zo is er een groeiend aantal beleidsmaatregelen die de

transitie stimuleren, verbeteren de nieuwe technologieën zich in rap tempo en brengen politieke en macro-economische ontwikkelingen onzekerheid met zich mee. Desalniettemin moeten vlootmanagers ervoor zorgen dat de investeringen passen binnen bestaande budgetten en dat de duurzaamheidsdoelstellingen van het bedrijf, haar klanten en verschillende overheden worden gehaald. Dit paper richt zich op deze uitdaging van vlootmanagement met diesel en elektrische vrachtwagens. Met behulp van een optimalisatiemodel worden de aanschaf en verkoop beslissingen van twee fictieve transportbedrijven bestudeerd. Daarnaast worden de operationele gevolgen, laadinfrastructuur investeringen en netaansluiting beslissingen meegenomen in het model. Met behulp van het optimalisatiemodel en de toepassing ervan kunnen de operationele-, financiële- en duurzaamheidseffecten van elektrische vrachtwagens worden blootgelegd. Deze bevindingen kunnen interessante inzichten geven voor zowel transportbedrijven als beleidsmakers.

Het vervolg van dit paper is als volgt: in hoofdstuk 2 wordt een kort overzicht gegeven van de achtergrond van dit paper met betrekking tot de literatuur, in hoofdstuk 3 wordt de methode beschreven en in hoofdstuk 4 en 5 volgen de resultaten, discussie en conclusie.

2. Achtergrond

Er is een groeiende interesse in de gevolgen van elektrische trucks op de logistieke sector. Op macroniveau zijn er studies die laten zien hoe technologische ontwikkelingen van BEVs de technologie geschikt maakt voor een groeiend aandeel van alle transportbewegingen (Forrest et al., 2020; Liimatainen et al., 2019; Speth & Plötz, 2024). Daarnaast zijn er onderzoeken naar de gevolgen van de elektrificatie van transport op het stroomnet (Borlaug et al., 2021; Zhang et al., 2023). Ook zijn er studies naar de vereisten en uitrol van publieke laadinfrastructuur, waaronder snelladers (Speth et al., 2025), batterij-wissel stations (Zhu et al., 2023) en electronic road systems (Bakker et al., 2024; Liao et al., 2024).

Op operationeel niveau zijn er veel studies naar de routeplanning van elektrische vrachtwagens, soms in een gemixte vloot met diesel vrachtwagens, om efficiënt om te gaan met laden en de beperkte actieradius (Asghari & Mirzapour Al-e-hashem, 2021). Specifiek voor depotladen zijn er onderzoeken die de laadplanning optimaliseren (Kullman et al., 2021) en bestuderen hoe stationaire batterijen en zonnepanelen kunnen helpen bij het reduceren van laadkosten (Liu et al., 2024).

2.1. Fleet replacement probleem

Dit paper bouwt primair voort op onderzoeken naar zogeheten fleet-replacement problemen. In een fleet-replacement probleem worden de aanschaf en verkoopbeslissingen van alle voertuigen in een vloot over meerdere jaren geoptimaliseerd, om zo de meest kosten-efficiënte vloot samen te stellen. Wanneer slechts 1 technologie – bijvoorbeeld diesel vrachtwagens – wordt beschouwd, balanceert een fleet replacement model de stijgende onderhoudskosten van oudere voertuigen met de aanschafkosten van

nieuwe voertuigen. De opkomst van elektrische alternatieven heeft de modellen echter gecompliceerd, omdat nu meerdere technologieën vergeleken moeten worden, inclusief de behoefte aan laadinfrastructuur, de operationele verschillen, de invloed van beleidsmatige interventies en toekomstige technologische ontwikkelingen.

De eerste fleet-replacement modellen waren voornamelijk gericht op kleinere voertuigen voor bijvoorbeeld postbedrijven (Kleindorfer et al., 2012) en licht wegtransport (Feng & Figliozzi, 2013). Latere studies zijn zich gaan richten op de energietransitie voor busbedrijven (Pelletier et al., 2019; Zhou et al., 2023). Recente studies hebben fleet-replacement problemen geïntroduceerd voor zwaarder vrachttransport, welke unieke uitdagingen meebrengt (Al-dal'ain & Celebi, 2021; Alp et al., 2022). Zwaarder vrachttransport wordt veelvuldig gebruikt voor langere afstanden en hebben meer variatie in operationeel gebruik, hetgeen gevolgen heeft voor de vlootplanning.

In ons onderzoek ligt de focus op zwaar transport voor regionale of lange-afstand doeleinden. In tegenstelling tot eerdere onderzoeken, introduceren wij investeringen in de elektriciteitsaansluiting op het depot en beschouwen we publiek snel-laden voor langere ritten in het fleet replacement model.

3. Methode

Voor het onderzoek is een mixed-integer program geformuleerd, welke in python is geïmplementeerd. Voor de verschillende parameters in dit beslismodel is grondig literatuuronderzoek gedaan. Het model is toegepast op twee casussen, een van een fictief bedrijf met transportbewegingen in Nederland alleen en een met transportbewegingen in Nederland, Duitsland en België.

3.1 Beslissingsvariabelen

Het beslismodel minimaliseert de totale kosten van de vloot over een tijdsperiode van 20 jaar. Ieder jaar worden keuzes gemaakt over het aanschaffen en verkopen van vrachtwagens, waarbij er 3 types vrachtwagen worden beschouwt: een diesel vrachtwagen (ICEV), een vrachtwagen met een 500 kWh batterij (BEV-500) en een vrachtwagen met een grotere 750 kWh batterij (BEV-750).

Voor de elektrische vrachtwagens moet geïnvesteerd worden in laadpalen voor het depot, waarbij uitgegaan wordt van langzaam laden tijdens de nacht. De totale laadcapaciteit van het depot is beperkt door de aansluiting op het stroomnet. Bij overschrijding hiervan is een investering in een grotere aansluiting noodzakelijk.

Een belangrijk onderdeel van het model is de beschouwing van operationele kosten als gevolg van investeringsbeslissingen. Hierbij worden de kosten voor brandstof, chauffeur en CO₂ belasting van vrachtwagens beschouwt, alsmede de kosten van het onderhoud van vrachtwagens en laadpalen en de variabele netkosten. Voor lange afstandstransport wordt gebruik gemaakt van publieke laadinfrastructuur, waarvoor een aparte kilowattuur prijs wordt gerekend. Tevens zorgt publiek laden voor een onderbreking van het transport.

Gegeven deze investerings- en operationele kosten, optimaliseert het model de investeringsbeslissingen voor vrachtwagens, laadpalen en de netaansluiting. Daarnaast kan het model de drie types voertuigen voor bepaalde ritten inzetten, bijvoorbeeld om publiek laden te minimaliseren.

3.2 Nationale en internationale casus

Het model wordt toegepast op twee casussen: een nationale en internationale casus. Het verschil tussen de casussen zit hem in de locatie van de klanten. Voor de nationale casus bevinden alle klantlocaties zich binnen Nederland, waardoor de ritten (depot-klant-depot) tot 700 kilometer zijn, waarvan het merendeel onder de 500 kilometer. Voor de internationale casus zijn er klantenlocaties in Nederland, Duitsland en België, waardoor de ritten tot 1100 kilometer kunnen zijn.

In beide gevallen zijn er rond de 50 klanten, met elk een transportvraag van 130 full-truckloads per jaar. Daarnaast is er een initiële vloot die precies genoeg vrachtwagens heeft om aan de vraag te voldoen. De leeftijd van alle vrachtwagens in de initiële vloot is verdeeld tussen de 0 en 7 jaar. Er wordt uitgegaan van een enkele dienst van 8 productieve uren per dag, waardoor er voldoende tijd is om de vrachtwagens gedurende de nacht op te laden met laadpalen van 50 kW. De vrachtwagens worden 250 dagen per jaar ingezet. In beide gevallen gaan we uit van een initiële netaansluiting van 175 kW.

3.3 Input parameters

Voor het fleet replacement model zijn een heel aantal input parameters nodig. Tabel 1 geeft een overzicht van de belangrijkste parameters. Een grote kostenpost is de aanschafprijs van vrachtwagens, waarvoor wij gebruik maken van de projecties van Xie et al. (2023), welke voor een bottom-up aanpak hebben gekozen. Voor alle vrachtwagen types bepalen zij de prijs van de verschillende onderdelen, waaronder de versnellingsbak, chassis, cabine etc. De totale prijs is de som van alle onderdelen, inclusief winstmarge en overhead. Op basis van deze kosten worden aanschafprijzen van vrachtwagens op de lange termijn geprojecteerd. Voor elektrische vrachtwagens bestaat een groot deel van de meerprijs uit de batterij. Een sterke prijsdaling van elektrische vrachtwagens wordt verwacht, voornamelijk als gevolg van sterk dalende batterijprijzen, schaalvoordelen in productie en een reductie van research & development kosten voor fabrikanten. Voor de toekomstige prijs van batterijen gebruiken we de projecties van Link et al. (2024). Naast de in Tabel 1 weergegeven parameters gebruiken wij chauffeurskosten van € 40 per uur, een CO₂ belasting van € 45 per ton en een discountfactor van 5%.

Daarnaast gaan we ervanuit dat publiek laden gecombineerd wordt met de verplichte pauze van de chauffeur, waardoor de verloren tijd beperkt blijft tot 30 minuten voor de BEV-500 en 60 minuten voor de BEV-750. Voor de netaansluiting zijn de opties 630 kW, 1750 kW, 5000 kW en 10.000 kW beschikbaar, met een aanschafprijs van €109.000, €205.000, €450.000 en €560.000 (Stedin, 2024). In het model gaan we ervanuit dat een investering in een grotere netaansluiting direct wordt uitgevoerd – hoewel er op veel plaatsen natuurlijk sprake is van vertraging door netcongestie.

Tabel 1. Parameters voor het fleet replacement model

Parameter	ICEV	BEV-500	BEV-750	Bron
Voertuigen				
Tank/batterij	500 liter	500 kWh	750 kWh	
Aanschafprijs (2025)	€ 156.000	€ 272.000	€ 346.000	(Link et al., 2024; Xie et al., 2023)
Aanschafprijs (2040)	€ 162.000	€ 157.000	€ 187.000	(Link et al., 2024; Xie et al., 2023)
Restwaarde (% van aanschaf)	20%	20%	20%	
Brandstofverbruik	0.33 l/km	1.25 kWh/km	1.28 kWh/km	(Alp et al., 2022; Speth & Plötz, 2024)
Onderhoudskosten (€/km)	0.18	0.13	0.13	(Basma & Rodríguez, 2023)
Operationele levensduur	8 jaar	8 jaar	8 jaar	(Noll et al., 2022)
Brandstof				
Brandstofkosten (depot)	1.50 €/L	0.23 €/kWh	0.23 €/kWh	(CBS, 2024; TLN, 2024)
Publiek laden prijs		0.40 €/kWh	0.40 €/kWh	(Scania, 2024)
Laadpalen				
Aanschaf		€ 25.000	€ 25.000	(Nicholas, 2019)
Onderhoud		2% van CAPEX		(Gunawan & Monaghan, 2022)
Operationele levensduur		10 jaar	10 jaar	(Nicholas, 2019)

4. Resultaten

In dit hoofdstuk presenteren we de resultaten van het onderzoek. De structuur is als volgt: eerst wordt de optimale vloot samenstelling voor de periode 2025-2040 gepresenteerd. Vervolgens worden de financiële gevolgen van de beslissingen weergegeven, in vergelijking met een vloot van dieselvrachtwagens. Tot slot worden de gevolgen voor de totale CO₂ uitstoot gegeven.

4.1 Optimale samenstelling van de vloot

In Tabel 2 wordt de optimale vlootsamenstelling weergegeven voor de jaren 2025-2040. Voor de Nationale casus, is het optimaal om vanaf 2028 stapsgewijs elektrische vrachtwagens te introduceren, waarbij vrachtwagens tegen het einde van hun levenscyclus worden vervangen door elektrische varianten. Vanaf 2034 leidt dit tot een volledig geëlektrificeerde vloot. Voor de Internationale casus, begint de transitie iets later en iets langzamer. Vanaf 2029 worden elektrische vrachtwagens geïntroduceerd, waarbij in 2036-2040 nog 30% van de vloot nog uit diesel vrachtwagens bestaat. Voor deze casus leidt de transitie ook tot een kleine vergroting van de vloot, omdat de vrachtwagens productieve tijd kwijtraken aan publiek laden.

Tabel 2. Optimale vlootsamenstelling van beide casussen over de jaren 2025-2040

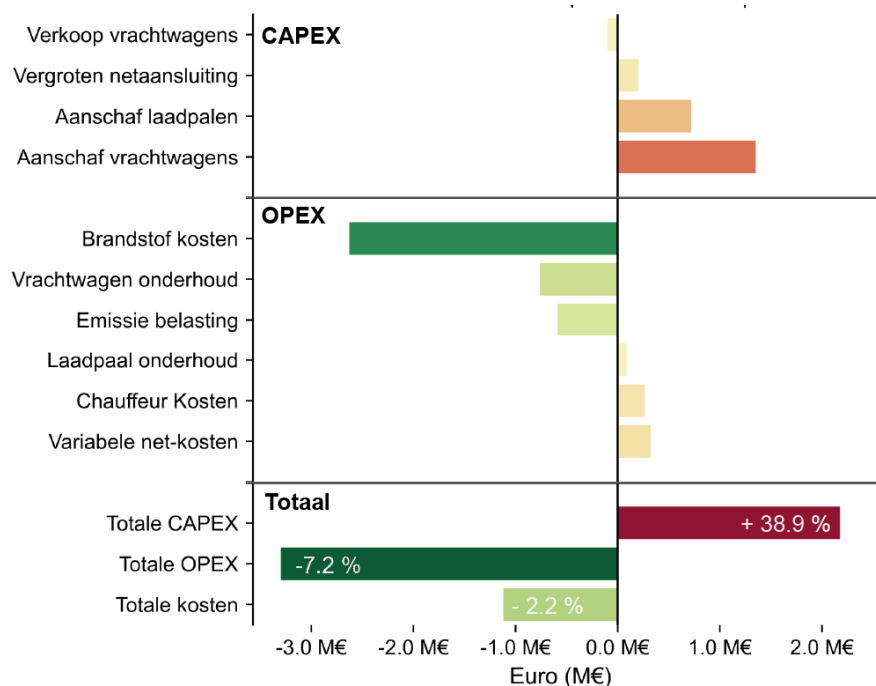
Casus	Type voertuig	2025	2028	2031	2034	2037	2040
Nationaal	ICEV	29	25	12	0	0	0
	BEV-500	0	4	8	19	19	17
	BEV-750	0	0	9	10	10	12
	Totaal	29	29	29	29	29	29
Internationaal	ICEV	49	49	37	28	15	15
	BEV-500	0	0	7	16	30	30
	BEV-750	0	0	5	5	5	5
	Totaal	49	49	49	49	50	50

Het fleet replacement model houdt ook rekening met de operationele inzet van de verschillende vrachtwagentypes, om inefficiëntie te voorkomen. Hierbij vallen een aantal zaken op. In beide gevallen worden de vrachtwagens bij voorkeur ingezet voor transportbewegingen die binnen de actieradius van de vrachtwagen vallen. Pas in een later stadium wordt gebruik gemaakt van publiek laden. Het model geeft de voorkeur aan de inzet van de BEV-500. Wanneer de actieradius van deze vrachtwagen onvoldoende is, verschuift de voorkeur naar een BEV-750 en pas daarna naar publiek laden met een BEV-500. Het is belangrijk om hierbij op te merken dat een aantal voordelen van een grotere batterij – zoals meer flexibiliteit – onvoldoende gewogen worden in het model. In de Internationale casus worden de dieselvrachtwagens ingezet om de klanten die het verst weg verwijderd zijn van het depot te bevoorraden.

4.2 Financiële gevolgen van de transitie naar elektrische vrachtwagens

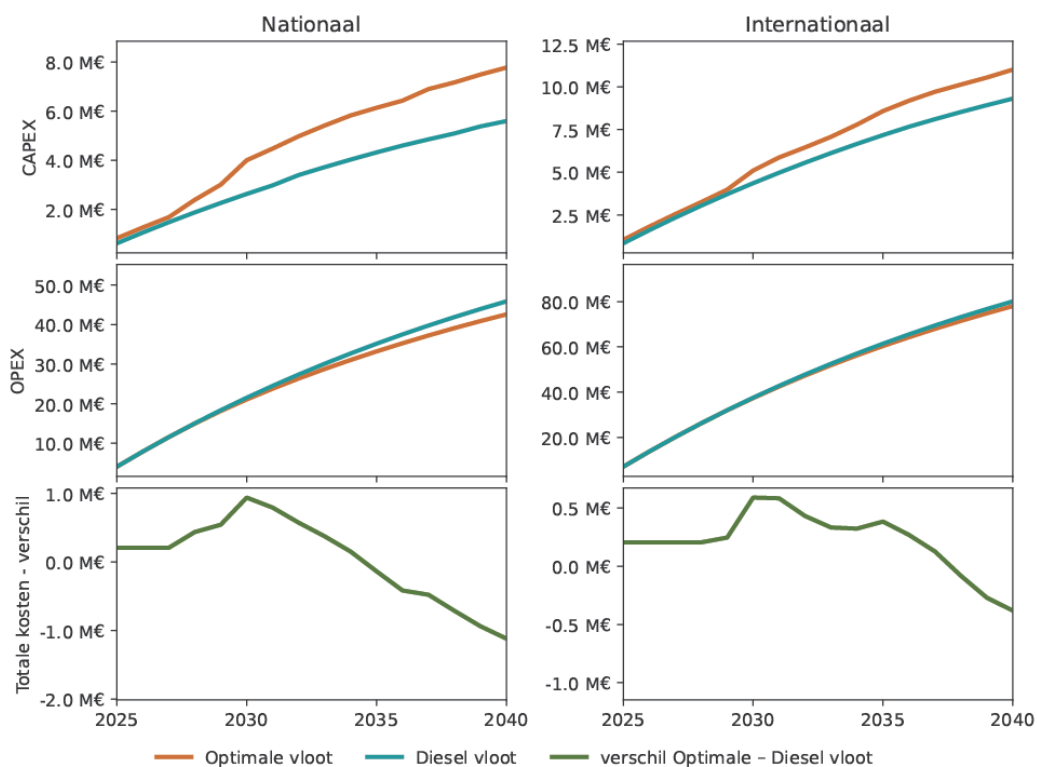
De introductie van elektrische vrachtwagens heeft – naast een totale kostenreductie – verschillende gevolgen voor de kostenstructuur van logistieke bedrijven. Om deze gevolgen verder te analyseren is een vergelijking gemaakt tussen een vloot volledig bestaand uit diesel vrachtwagens, en de optimale vloot zoals bepaald door ons beslismodel. Deze gevolgen zijn per kostenpost inzichtelijk gemaakt voor de Nationale casus in Figuur 1. De Internationale casus toont sterk vergelijkbare resultaten.

De baseline in Figuur 1 is de diesel vloot, waarbij de staven weergeven hoeveel de optimale vloot hiervan afwijkt. Een aantal zaken valt op. Ten eerste is er een substantiële toename in kapitaalinvesteringen (CAPEX), met name door de hogere aanschafprijs van elektrische vrachtwagens, laadpalen en de netaansluiting. In totaal leidt deze verandering tot een 38.9% hogere CAPEX gedurende de jaren 2025-2040. Tegelijkertijd zien we een flinke reductie in operationele kosten (OPEX), met als uitschieter lagere brandstofkosten. Daarnaast zijn een reductie in onderhoudskosten (vooralsnog een onzekere post omdat er weinig data bekend is) en een lagere emissie belasting (ETS 2) de belangrijkste drijfveren van kostenreducties. Er is echter wel sprake van een toename in chauffeurskosten als gevolg van publiek laden, wat in de Internationale casus nog eens extra versterkt is. In totaal is er een reductie van -7.2% op operationele kosten. De totale kostenvermindering van de optimale vloot ten opzichte van de volledige diesel vloot bedraagt 2.2% over de jaren 2025-2040.



Figuur 1. Relatieve verandering in kosten tussen de optimale vloot en een diesel vloot.

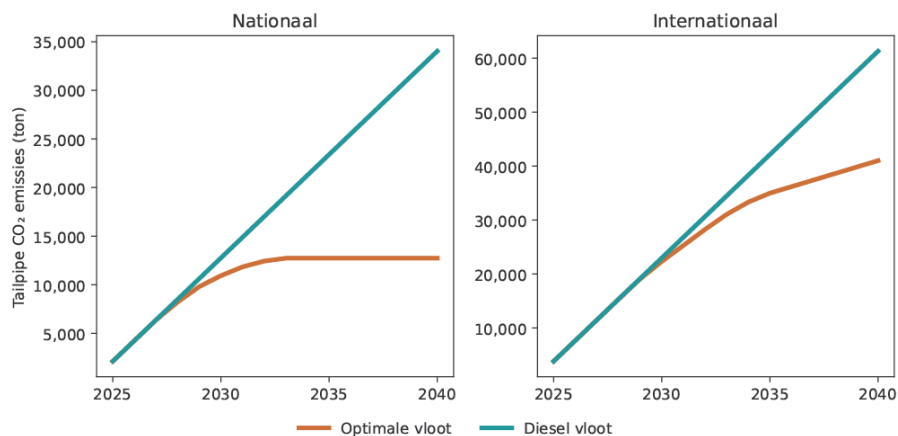
De transitie naar elektrische vrachtwagens vergt forse investeringen aan de voorkant, waarbij de lagere operationele kosten later in de tijd plaatsvinden. Dit heeft gevolgen voor de cashflow van logistieke ondernemers. In Figuur 2 wordt dit effect nader weergegeven. Hierbij zijn de cumulatieve CAPEX, OPEX en het totale kostenverschil tussen de diesel en de optimale vloot weergegeven over de periode 2025-2040, voor zowel de Nationale als de Internationale casus. Wat betreft de CAPEX, vindt het gros van de meer-investeringen plaats in de periode 2028-2030 voor de Nationale casus en tussen 2030-2035 voor de Internationale. Deze meer-investeringen zijn als volgt te verklaren. Ten eerste zijn elektrische vrachtwagens in deze periode nog substantieel duurder dan de diesel variant. Dit gat wordt in onze inputparameters pas rond 2040 gedicht. Ten tweede vergt de eerste lading elektrische vrachtwagens investeringen in laadpalen – welke een langere operationele levensduur hebben dan vrachtwagens – en een eenmalige investering in de elektriciteitsaansluiting. In alle gevallen wordt er geïnvesteerd in een aansluiting met voldoende capaciteit voor volledige elektrificatie. De OPEX reducties vinden vooral plaats in de tweede helft van de tijdsperiode, wanneer het aantal elektrische vrachtwagens een substantieel aandeel van de vloot omvat. Het is belangrijk om hierbij in ogenschouw te nemen dat de totale OPEX uitgaven een veelvoud van de CAPEX uitgaven is, waardoor een relatief kleine reductie een grote impact kan hebben op de totale kosten over de volledige planningperiode. Al met al laten de totale kosten van de optimale vloot initieel dus een stijging zien ten opzichte van een volledige diesel vloot, als gevolg van de CAPEX uitgaven, om pas op een later moment te dalen tot het punt waarop in beide cases een kostenbesparing gehaald wordt.



Figuur 2. Cumulatieve kosten – verschil tussen diesel en optimale vloot.

4.3 CO₂ emissies van de optimale vloot

Een van de andere gevolgen van de introductie van elektrische vrachtwagens is een reductie in CO₂-emissies. Figuur 3 geeft een overzicht van de cumulatieve 'tailpipe emissies' – de CO₂-emissies van de productie van elektriciteit zijn dus niet meegenomen. In beide gevallen is er een reductie van cumulatieve CO₂-emissies, -62.6% voor Nationaal en -33.1% voor Internationaal. De emissiereducties vinden met name plaats in de tweede helft van de planningsperiode, wanneer een aanzienlijk aandeel van de vloot uit elektrische vrachtwagens bestaat. De minder sterke daling in het geval van de Internationale casus kan worden verklaard door het feit dat de langste – en dus meest vervuulende ritten – met diesel vrachtwagens plaatsvindt; ook nog aan het eind van de planningsperiode.



Figuur 3. Cumulatieve tailpipe CO₂ emissies – verschil tussen diesel en optimale vloot.

5. Discussie en conclusie

Elektrische vrachtwagens zijn een van de oplossingen om de logistieke sector te verduurzamen. Onze resultaten laten zien dat elektrische vrachtwagens naast een reductie in CO₂-emissies ook kunnen zorgen voor kostenbesparingen voor bedrijven in de logistieke sector. In het algemeen zien we dat een snelle transitie naar elektrische vrachtwagens optimaal is wanneer er alleen gebruik gemaakt kan worden van depot-laden, wat zorgt voor minimale interruptie van de normale werkzaamheden en waarmee de kosten van elektriciteit zo laag mogelijk gehouden kunnen worden. Publiek laden speelt, met name op de korte termijn, geen grote rol. De huidige prijs voor publiek laden ondermijnt namelijk de business case van elektrische vrachtwagens, wat de adoptie van elektrische vrachtwagens in de vloot vertraagt.

De transitie heeft echter belangrijke gevolgen voor de financiële structuur van logistieke bedrijven. Er is sprake van een verschuiving van operationele kosten naar kapitaalinvesteringen. Dit betekent dat logistieke bedrijven een risico nemen wanneer er gehandeld wordt naar de optimale fleet-management uitkomsten. Op de korte termijn is er sprake van hogere totale kosten, welke in een later stadium worden terugverdient. Tegelijkertijd betekent dit dat logistieke bedrijven die slechts beperkt toegang hebben tot kapitaal – denk aan MKB bedrijven – moeite zullen hebben om de benodigde investeringen op te brengen. Overheden kunnen hierbij een oplossing bieden, in de vorm van toegankelijke leningen (om de kasstroom te helpen) of in de vorm van subsidies voor laadinfrastructuur (SPRILA) en vrachtwagens (aanZET) om de totale investeringen te reduceren.

Elektrische vrachtwagens kunnen een bedrijfje leveren aan nationale en internationale duurzaamheidsdoelstellingen, gelet op de lagere tailpipe CO₂-emissies. Onze resultaten laten daarbij zien dat winstgevenheid en duurzaamheidsdoelstellingen in sommige gevallen hand in hand kunnen gaan, gegeven dat er geen investerings of stroomnet barrières zijn. Hierbij is echter wel een groot verschil zichtbaar; bedrijven die gebruik kunnen maken van goedkoop depot laden kunnen makkelijker en kostenefficiënter elektrificeren dan bedrijven die afhankelijk zijn van publiek laden. Het is daarom belangrijk om bij het stellen en evalueren van duurzaamheidsdoelstellingen rekening te houden met de specifieke omstandigheden van een transporteur.

In algemene zin vraagt de transitie naar elektrische vrachtwagens een lange termijnperspectief van logistieke bedrijven. De investering in de juiste netaansluiting vereist een inschatting van toekomstige elektriciteitsvraag. Daarnaast is het belangrijk om een zo goed mogelijk beeld te krijgen van belangrijke onzekerheden zoals de gevolgen van Europees en nationaal beleid, technologische ontwikkelingen en toekomstige energieprijzen. Het is hierbij belangrijk om verder te kijken dan de total cost of ownership van een enkele vrachtwagen: veel gevolgen van elektrische vrachtwagens zijn op vloot-niveau. Zo worden de financiële gevolgen pas op vloot-niveau zichtbaar, alsmede de gevolgen voor de operationele planning, de uitdaging van depot-laden en het bereiken van duurzaamheidsdoelstellingen.

Referenties

- Al-dal'ain, R., & Celebi, D. (2021). Planning a mixed fleet of electric and conventional vehicles for urban freight with routing and replacement considerations. *Sustainable Cities and Society*, 73. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103105>
- Al-Hanahi, B., Ahmad, I., Habibi, D., & Masoum, M. A. S. (2022). Smart charging strategies for heavy electric vehicles. *ETransportation*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100182>
- Alp, O., Tan, T., & Udenio, M. (2022). Transitioning to sustainable freight transportation by integrating fleet replacement and charging infrastructure decisions. *Omega (United Kingdom)*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102595>
- Bakker, J., Lopez Alvarez, J. A., & Buijs, P. (2024). A network design perspective on the adoption potential of electric road systems in early development stages. *Applied Energy*, 361. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122887>
- Basma, H., & Rodríguez, F. (2023). *A total cost of ownership comparison of truck decarbonization pathways in Europe*. www.theicct.org
- Borlaug, B., Muratori, M., Gilleran, M., Woody, D., Muston, W., Canada, T., Ingram, A., Gresham, H., & McQueen, C. (2021). Heavy-duty truck electrification and the impacts of depot charging on electricity distribution systems. *Nature Energy*, 6(6), 673–682. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00855-0>
- CBS. (2024). *Eindverbruikersprijzen aardgas en elektriciteit*. <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/85666NED/table?dl=AD776>
- Feng, W., & Figliozzi, M. (2013). An economic and technological analysis of the key factors affecting the competitiveness of electric commercial vehicles: A case study from the USA market. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 26, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.06.007>
- Forrest, K., Mac Kinnon, M., Tarroja, B., & Samuelsen, S. (2020). Estimating the technical feasibility of fuel cell and battery electric vehicles for the medium and heavy duty sectors in California. *Applied Energy*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115439>
- Gunawan, T. A., & Monaghan, R. F. D. (2022). Techno-econo-environmental comparisons of zero- and low-emission heavy-duty trucks. *Applied Energy*, 308. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118327>
- ITF. (2023). *Transport Outlook 2023*. OECD. <https://doi.org/10.1787/b6cc9ad5-en>
- Kleindorfer, P. R., Neboian, A., Roset, A., & Spinler, S. (2012). Fleet renewal with electric vehicles at la Poste. *Interfaces*, 42(5), 465–477. <https://doi.org/10.1287/inte.1120.0640>
- Kullman, N. D., Goodson, J. C., & Mendoza, J. E. (2021). Electric vehicle routing with public charging stations. *Transportation Science*, 55(3), 637–659. <https://doi.org/10.1287/trsc.2020.1018>

- Liao, X., Saeednia, M., Nogal, M., & Tavasszy, L. (2024). Scaling up dynamic charging infrastructure: Significant battery cost savings. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104128>
- Liimatainen, H., van Vliet, O., & Aplyn, D. (2019). The potential of electric trucks – An international commodity-level analysis. *Applied Energy*, 236, 804–814. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.017>
- Link, S., Stephan, A., Speth, D., & Plötz, P. (2024). Rapidly declining costs of truck batteries and fuel cells enable large-scale road freight electrification. In *Nature Energy* (Vol. 9, Issue 8, pp. 1032–1039). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01531-9>
- Liu, X., Plötz, P., Yeh, S., Liu, Z., Liu, X. C., & Ma, X. (2024). Transforming public transport depots into profitable energy hubs. *Nature Energy*. <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01580-0>
- Mulholland, E., Teter, J., Cazzola, P., McDonald, Z., & Ó Gallachóir, B. P. (2018). The long haul towards decarbonising road freight – A global assessment to 2050. *Applied Energy*, 216, 678–693. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.058>
- Nicholas, M. (2019). *Estimating electric vehicle charging infrastructure costs across major U.S. metropolitan areas*.
- Noll, B., del Val, S., Schmidt, T. S., & Steffen, B. (2022). Analyzing the competitiveness of low-carbon drive-technologies in road-freight: A total cost of ownership analysis in Europe. *Applied Energy*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118079>
- Pelletier, S., Jabali, O., Mendoza, J. E., & Laporte, G. (2019). The electric bus fleet transition problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 109, 174–193. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.10.012>
- Scania. (2024). *charging acces - price list*. <https://www.scania.com/content/dam/group/about-us/innovation/technology/electrification/pdf-pricing-list/price.list.pdf>
- Speth, D., & Plötz, P. (2024). Depot slow charging is sufficient for most electric trucks in Germany. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 128, 104078. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104078>
- Speth, D., Plötz, P., & Wietschel, M. (2025). An optimal capacity-constrained fast charging network for battery electric trucks in Germany. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 193. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2025.104383>
- Stedin. (2024). *Zakelijke tarieven Stedin*. <https://www.stedin.net/zakelijk/betalingen-en-facturen/tarieven>
- Sugihara, C., Hardman, S., & Kurani, K. (2023). Social, technological, and economic barriers to heavy-duty truck electrification. *Research in Transportation Business and Management*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2023.101064>
- TLN. (2024). *Brandstofmonitor Nederland / TLN Nederland — tln.nl*. <https://www.tln.nl/ledenvoordeel/brandstofmonitor>

- Xie, Y., Basma, H., & Rodríguez, F. (2023). *Purchase costs of zero-emission trucks in the United States to meet future Phase 3 GHG standards*. www.theicct.org
- Zhang, Q., Yan, J., Gao, H. O., & You, F. (2023). A Systematic Review on power systems planning and operations management with grid integration of transportation electrification at scale. In *Advances in Applied Energy* (Vol. 11). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100147>
- Zhou, Y., Ong, G. P., & Meng, Q. (2023). The road to electrification: Bus fleet replacement strategies. *Applied Energy*, 337. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120903>
- Zhu, F., Li, L., Li, Y., Li, K., Lu, L., Han, X., Du, J., & Ouyang, M. (2023). Does the battery swapping energy supply mode have better economic potential for electric heavy-duty trucks? *ETransportation*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100215>