

Brandveiligheid elektrische bussen in relatie tot tunnelveiligheid

Auteurs

Nils Rosmuller	(Instituut Fysieke Veiligheid)
Tamo Vogel	(Instituut Fysieke Veiligheid)
Etienne van der Horst	(Vervoerregio Amsterdam/VHD Advies)
Allart Lensvelt	(Schiphol Amsterdam Airport)

Inleiding

Nederland is een transport- en vervoerland, of het nu over de weg, het spoor of het water gaat. (Personen)vervoer over de weg in Nederland 'moet' verduurzamen. Elektrische personenauto's¹ dragen daaraan bij, maar ook steeds duurzamere brandstoffen en alternatieven in het openbaar vervoer leveren hun bijdrage².

Dat is natuurlijk goed nieuws. De keerzijde van deze medaille is dat met dergelijke duurzaamheid bevorderende innovaties ook mogelijke veiligheidsrisico's worden geïntroduceerd die we soms wel, maar soms nog niet kennen. Desondanks is de wens het vervoer te blijven faciliteren. Een dergelijke wens manifesteert zich nog sterker wanneer 'nieuwe brandstoffen' door wegtunnels gaan rijden: wat zijn hiervan de risico's, hoe groot zijn deze en welke maatregelen zijn passend?

Dat ten behoeve van elektrische bussen in tunnels de veiligheid goed geregeld moet zijn is evident. Dit artikel verschaft de eerste bouwstenen voor de duiding van de brandrisico's van elektrische bussen in tunnels. Deze eerste duiding heeft geresulteerd in condities die opgenomen kunnen worden in het ontwerp van elektrische bussen.

Tunnelveiligheid

Inzake de tunnelveiligheid bestaat er in Nederland de Wet Aanvullende Regels Veiligheid Wegtunnels (WARVW, 2013), ook wel de Tunnelwet genoemd. De basis hiervoor is de Europese directive 2004/54/EG (EU, 2004) welke de minimale veiligheidseisen voor tunnels benoemd. De Nederlandse wetgeving is strenger (COB, 2016) op onder meer de volgende onderdelen (niet alle genoemd):

- Reeds van toepassing op tunnels langer dan 250 meter in plaats van 500 meter.
- Uitsluitend eenrichtingsverkeer in plaats van 2 richtingsverkeer.
- Hart-op-hart afstand tussen vluchtdeuren maximaal 250 meter in plaats van 500 meter.
- Hart-op-hart afstand brandblusaansluitingen maximaal 100 meter in plaats van 250 meter.
- Minimale tunnelbuisbreedte van 7 meter in plaats van onbenoemd.

Tunnelveiligheid wordt bepaald door het ontwerp van de tunnel, de voertuigen, het gebruik en gedrag van personen in de voertuigen, de tunnelbeheerorganisatie en hulpverleningsmogelijkheden. Het tunnelontwerp, de tunneltechnische installaties en de organisatie (veiligheidsbeheersysteem en incidentbestrijding) leveren een grote bijdrage aan de veiligheid in de tunnel. Uiteindelijk zal het geheel (van elektrische bussen in de tunnel en de incidentbestrijding) moeten worden beschouwd om de veiligheid van een tunnel te beoordelen.

¹ Zie actieplan elektrisch vervoer waarin streefgetal van 1 mio elektrische voertuigen in 2025 wordt genoemd

² Zie bestuursakkoord 'Zero Emissie Regionaal Openbaar Vervoer Per Bus'

De beoordeling in Nederland van de veiligheid van een wegtunnel vindt onder meer plaats door een kwantitatieve risicoanalyse (QRA), om aan te tonen dat de tunnel aan de wet- en regelgeving voldoet. Het hiertoe beschikbare RWS QRA model is voor 'standaard' Rijkswegtunnels. Het gaat dan om tunnels die langer zijn dan 250 meter en onderdeel vormen van de hoofdwegeninfrastructuur. De gevaren van elektrische bussen vormen (nog) geen onderdeel van dit rekenmodel.

Tunnels in de Nederlandse hoofdwegeninfrastructuur zijn geclassificeerd conform Europese wet- en regelgeving in 5 categorieën A t/m E. De categorisering bepaalt met welke gevaarlijke stoffen er door heen mag worden gereden. In categorie A zijn er geen beperkingen voor het vervoer van gevaarlijke stoffen, in categorie E mogen er geen gevaarlijke stoffen door de tunnel vervoerd worden. Gekoppeld aan de tunnelcategorie heeft men in Nederland een standaardpakket aan (veiligheids)maatregelen voorgeschreven: de landelijke tunnelstandaard. Deze wordt overigens in 2017 geëvalueerd.

Onderzoeksopzet

Het onderzoek is uitgevoerd naar aanleiding van de wens van de Vervoerregio Amsterdam en Amsterdam Airport Schiphol om in de uitvraag van de nieuwe OV-concessie elektrisch busvervoer op Schiphol voor te schrijven. Daarbij zullen deze elektrische bussen ook door de Buitenveldertunnel moeten rijden, hetgeen de vraag oproept om meer inzicht te krijgen in de mogelijke extra risico's en consequenties van het rijden op *battery packs* in relatie tot tunnelveiligheid. In dit artikel is niet de Buitenveldertunnel als uitgangspunt genomen, maar wordt de veiligheid van elektrische bussen gerelateerd aan tunnelveiligheid in het algemeen.

Om duiding te geven aan de extra dan wel andere gevaren van elektrische bussen ten opzichte van dieselbussen is een literatuuronderzoek uitgevoerd. Daartoe zijn publicaties, onderzoeken en wetenschappelijke artikelen gezocht en geraadpleegd om uit te vinden welke typen van batterijen gebruikt worden in het busvervoer van personen en welke risico's met de meest gebruikelijke *battery pack* samenhangen. Daarbij is vooral gefocust op de gevaren die optreden bij brand en is in mindere mate gekeken naar de extra risico's als gevolg van elektriciteit en spanning. Naast het bestuderen van relevante literatuur zijn er enkele gesprekken gevoerd met experts en deskundigen op het gebied van elektrische voertuigen en (brand)veiligheid.

De opgedane kennis heeft geresulteerd in een kwalitatieve vergelijking tussen de gevaren van een elektrische bus en die van een dieselbus, geplaatst in het perspectief van tunnelveiligheid. Hierbij is bewust gekozen voor een kwalitatieve vergelijking omdat op diverse onderdelen nog onvoldoende kwantitatieve en passende (vergelijkings-)gegevens beschikbaar zijn. Deze kwalitatieve vergelijking is verderop in dit artikel terug te vinden (IFV, 2016). In de volgende paragraaf wordt eerst kort ingegaan op de specifieke gevaren van het elektrisch busvervoer.

Brandveiligheid elektrische bus

Er zijn verschillende typen *battery packs* (accubatterijen) die toegepast worden in elektrische en hybride voertuigen, waarbij voor lichte- en zware voertuigen op dit moment het vaakst gekozen wordt voor Lithium-Ion batterijen (Li-ion batterijen) (Air Resources Board, 2015). Het gebruik van Li-ion batterijen is mede zo populair doordat deze een relatief hoge energiedichtheid kennen in relatie tot hun gewicht, wat weer positief is voor het vermogen en de actieradius van voertuigen. Er bestaan meerdere soorten li-ion batterijen, waarbij onder andere het verschil in chemische samenstelling ervoor zorgt dat elke soort zijn eigen voor- en nadelen heeft. Zo zijn er verschillen in kosten van de batterij, het vermogen en de levensduur. Ook op het gebied van veiligheid verschillen de typen li-ion

batterijen onderling. Volgens de Air Resources Board (2015) zouden lithium-titanate en lithium-ijzer-fosfaat batterijen daarbij het meest veilig zijn in het gebruik.

De verschillende typen van batterijen moeten aan (internationale) standaarden voldoen waarin wordt geëist dat kan worden aangetoond dat de batterijen aan een groot aantal technische eisen voldoen. Denk hierbij aan Amerikaanse, Europese en ook aan Chinese normeringen³. Hierin worden randvoorwaarden gesteld voor overstroom, overspanning, punctie, externe hitte, lekkage, ventileren bij hoge temperaturen et cetera. In dit artikel gaan we niet nader in op bestaande normering van de batterij zelf. We richten ons in deze rapportage op de brandveiligheid van het *battery pack* in de bus en de brandveiligheid van de elektrische bus in de tunnel.

Kijkend naar de gevaren van li-ion batterijen, dan kunnen deze opgesplitst worden in drie verschillende categorieën (Long, Blum, Bress, & Cotts, 2013). Allereerst zijn er *chemische* gevaren vanwege de gevaarlijke stoffen die in batterijen gebruikt worden. Dit speelt bijvoorbeeld een rol bij lekkage van een batterij waarbij het vloeibare elektrolyt vrijkomt. Daarnaast leveren batterijen *elektrische* gevaren op. Batterijen leveren immers spanning en door het in serie schakelen van meerdere batterijcellen kunnen grote vermogens worden bereikt. Dit kan gevaar opleveren bij fysiek contact met onder spanning staande delen. Als laatste leveren batterijen *thermische* gevaren op: de batterijen kunnen heet worden, een temperatuursverhoging zelf in stand houden en uiteindelijk in brand vliegen of brand veroorzaken (Long et al., 2013). Hierbij speelt een rol dat li-ion batterijen relatief veel brandbare stoffen bevatten (zoals metallisch lithium en oplosmiddelen), die bij een verhoogde temperatuur brandbare gassen vormen. Door de gasvorming zwelt de batterij op en kan deze onder druk bezwijken. Daarbij komen schadelijke en brandbare gassen vrij en kunnen er flinke steekvlammen ontstaan (Oude Wolbers, Molenaar, Van der Veen, Bosma, & Meessen, 2015).

Bij opwarming van de batterijen is misschien wel het grootste gevaar het optreden van een zogenaamde 'thermal runaway'. Thermal runaway is een falingsmechanisme dat leidt tot zelfverhitting in een batterij, waarbij brandbare gassen vrij kunnen komen die bij voldoende zuurstof en een ontstekingsbron tot ontbranding kunnen komen (Mikolajczak, Kahn, White, & Long, 2011) & (Colella, et al., 2016). Op dit moment zijn er *geen intrinsiek veilige* Li-ion batterijen. *Battery packs* hebben allemaal hun eigen veiligheidsmarges. Wanneer condities hier buiten komen, kan dit leiden tot thermal runaway in een batterij (Air Resources Board, 2015). Een falende batterij kan het gevolg zijn van een ontwerp- of productiefout, maar een batterij kan ook falen door externe factoren zoals onjuist gebruik of blootstelling aan (extreme) omstandigheden. Temperaturen waarbij een thermal runaway op kan treden liggen, afhankelijk van het type batterij, gemiddeld tussen ca 55 en 250°C (Oude Wolbers et al., 2015). De thermal runaway is de meest gangbare vorm van een (catastrophic) falingsmechanisme dat kan leiden tot brand in batterijen. Het optreden van een thermal runaway in een afzonderlijke batterij cel kan namelijk door opwarming van deze cel een kettingreactie veroorzaken. Hierbij worden naastgelegen batterijcellen opgewarmd, welke vervolgens ook in een thermal runaway geraken.

In de literatuur is gezocht naar informatie over de (extra) gevaren van elektrische voertuigen en naar informatie over het vrijkomen van giftige stoffen, kenmerkende brandgegevens zoals de *heat release rate* en incidentbestrijding bij brand. Ook zijn er enkele onderzoeken geraadpleegd waarbij middels brandexperimenten elektrische auto's zijn vergeleken met auto's op conventionele brandstoffen als

³ a) Functionaliteit: ISO 6469 en ISO 12405-2; b) Beschadiging door extern geweld en elektrisch "misbruik": UN38,3 - UL 1642 - QC/T (743) 2006 of GB/T 31484 2015; c) Betrouwbaarheid ISO 12405-2 Homologatie (systemniveau): R100.02.

diesel. De gevonden informatie heeft als input gediend voor een kwalitatieve vergelijking tussen de gevaren en risico's bij brand in elektrische bussen versus brand in bussen die op diesel rijden. In de volgende paragraaf wordt hierop nader ingegaan.

Kwalitatieve vergelijking elektrische bus versus dieselbus

Binnen het verkennende onderzoek zijn de gevaaraspecten als gevolg van het *battery pack* van de elektrische bus op verschillende aspecten kwalitatief vergeleken met een dieselbus. In tabel 1 is te zien op welke aspecten de vergelijking is uitgevoerd. In de rechterkolom is het resultaat van de vergelijking te vinden. Onze conclusie op basis van deze tabel luidt dat elektrische bussen niet onveiliger lijken te zijn (vanwege enkele thans nog bestaande onzekerheden) dan dieselbussen.

Tabel 1: Vergelijking tussen elektrische bussen en dieselbussen

Vergelijkingsaspect	Elektrische bus vs. Dieselbus
Brand van brandstof:	Bij elektrische bus is de kans kleiner dan bij dieselbus
<i>Toelichting:</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Kans op brand in battery pack door (intern) falen van een batterij cel is erg klein. - Diesel is een brandbare vloeistof die relatief gemakkelijk brandbare dampen kan geven 	
Brandontwikkeling	Bij elektrische bus is de ontwikkeling trager en met geringere intensiteit dan bij dieselbus
<i>Toelichting:</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Heat Release Rate van elektrische batterijen lijkt lager te zijn dan van koolwaterstoffen zoals diesel - Koolwaterstoffen (diesel) kennen een brandcurve waarin de temperatuur in de eerste paar minuten zeer snel stijgt en de brand zich snel ontwikkelt. - Batterijcellen hebben aanlooptijd nodig om op te warmen, uit te gassen en vervolgens aan de verbranding deel te nemen. Hierdoor is het brandverloop eerst meer gelijkmatig en pas bij optreden thermal runaway wordt dit exponentieel versneld. 	
Toxiciteit	Elektrische bus heeft groter potentieel aan giftige gassen dan dieselbus
<i>Toelichting:</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Bij een brand in een elektrische bus zal meer van het giftige gas waterstoffluoride vrijkomen - Meer onderzoek is nodig om gevolgen op gebied van toxiciteit in kaart te brengen 	
Elektriciteit	Elektrische bus kent meer elektrische gevaren dan dieselbus
<i>Toelichting:</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - In elektrische bussen bevinden zich meer en andere spanningsbronnen die voor (veel) grotere elektrische vermogens en spanning zorgen dan in conventionele bussen op diesel. - Verhoogd gevaar op elektrocutie bij gebruik hydraulisch gereedschap door hulpdiensten. 	
Carcinogeniteit	-
<i>Toelichting:</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Op dit moment is er onvoldoende informatie beschikbaar over het verschil in carcinogeniteit tussen diesel en Li-ion batterijen. Nader onderzoek is nodig om te bepalen of hier al gegevens over bekend zijn. 	
Bestrijdbaarheid brand	Bij elektrische bus is brand moeilijker te bestrijden dan dieselbus
<i>Toelichting:</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Branden met Li-ion batterijen zijn moeilijk te bestrijden - Voor een effectieve blussing en koeling van een Li-ion batterij is zeer veel water nodig - Zelfs na geruime tijd koelen blijft er voor langere tijd kans op herontsteking in een batterij cel 	

14 condities

Uit de analyse van de risico's van elektrische bussen volgt dat elektrische bussen niet onveiliger lijken te zijn dan dieselbussen. Wel zijn er voor enkele extra gevaren en onzekerheden een aantal maatregelen mogelijk die de bijhorende risico's van elektrische bussen kunnen reduceren. Binnen het onderzoek zijn één hoofdconditie en meerdere subcondities geformuleerd. Deze worden in deze paragraaf kort toegelicht.

De hoofdconditie luidt dat ervoor gezorgd moet worden dat er geen thermal runaway op kan treden, dan wel dat de kans hierop zo laag mogelijk is. Dit vergroot de brandveiligheid van de bus aanzienlijk. De subcondities zijn onderverdeeld naar maatregelen ter voorkoming van brand in een *battery pack*, maatregelen die de gevolgen bij brand in een *battery pack* beperken en op subcondities die een effectieve incidentbestrijding faciliteren.

Bij de maatregelen die ingaan op het voorkomen van brand in een *battery pack* zijn voornamelijk condities geformuleerd die de kans op het optreden van een thermal runaway moeten beperken. Deze zijn deels gebaseerd op het artikel van Larsson et al. (2016). De volgende condities zijn daarbij geformuleerd:

1. Zorg voor deugdelijke interne en externe compartimentering van het *battery pack* in de bus.
2. Creëer voldoende fysieke afstand tussen het *battery pack* en andere brandgevoelige onderdelen van de bus.
3. Zorg voor een deugdelijk voorziening die voltage, spanning en temperatuur van het *battery pack* continu monitort (bijv. 'Battery Management Systeem' (BMS)).
4. Zorg voor een deugdelijk verpakking, afscherming en montage van het *battery pack* (bijv. een 'Mechanical Crash Structure' (MCS)).
5. Zorg voor een voorziening waardoor het *battery pack* automatisch wordt uitgeschakeld bij een incident (bijv. 'High Voltage Connectors/Disconnectors').
6. Zorg voor een deugdelijke bescherming tegen kortsluiten (bijv. een 'Short Circuit Protection').
7. Zorg voor een deugdelijke voorziening om de temperatuur in een *battery pack* te monitoren (bijv. een Thermal Management System (TMS)).

Daarnaast zijn er subcondities geformuleerd om de gevolgen van brand in een elektrische bus zo veel mogelijk te beperken. Daarbij denken wij aan de volgende subcondities:

8. Zorg voor een installatie die chauffeur en passagiers direct waarschuwt bij een 'thermal runaway'
9. Zorg voor een brandwerende scheiding *tussen* batterijpakket en passagierscompartiment
10. Zorg voor een deugdelijke bescherming van het passagierscompartiment tegen toxische gassen
11. Zorg voor brandwerende scheidingen *in* het *battery pack*

Als laatste zijn er subcondities geformuleerd welke de kans op een succesvolle incidentbestrijding kunnen vergroten. Dit heeft bijvoorbeeld te maken met de bereikbaarheid van het *battery pack* voor de brandweer en het goed kunnen blussen en koelen van de batterijcellen. De volgende subcondities zijn hierbij geformuleerd:

12. Zorg ervoor dat hulpverleningsdiensten veilig bij en aan het voertuig kunnen werken door het voertuig bij een noodsituatie spanningsloos te maken.
13. Zorg ervoor dat het *battery pack* goed te bereiken is voor het blusmiddel van de brandweer.
14. Zorg voor een voorziening aan de bus waardoor deze bij incidenten uit de tunnel gesleept kan worden (bijv. een of meerdere trekogen).

Tunnelveiligheid wordt bepaald door het ontwerp van de tunnel, de voertuigen, gebruik/gedrag van personen in de voertuigen en hulpverleningsmogelijkheden. Indien opvolging wordt gegeven aan de voorgestelde condities dan lijkt het dat de veiligheid in tunnels voldoende is gegarandeerd voor elektrische bussen op *battery packs*. Natuurlijk zullen ook aan het tunnelontwerp zelf en het gebruik van de tunnel eisen gesteld kunnen worden ten behoeve van de veiligheid. Tevens zullen opleiding, training en oefening van de buschauffeur en hulpdiensten bijdragen aan een verhoogde veiligheid van elektrische bussen in tunnels.

Reflectie en Vervolg

De uitkomsten van het onderzoek zijn gebaseerd op een (in tijd) beknopte literatuurstudie naar de (brand)veiligheid in tunnelomgevingen van elektrische bussen die rijden op *battery packs*. Door nog meer tijd te besteden aan het zoeken naar relevante kennis en informatie zou nog meer materiaal naar boven kunnen komen, echter wij denken het landschap hieromtrent behoorlijk in kaart te hebben gebracht in het licht van ons doel.

Vanwege de aard van de onderzoeksvraag en de focus op het voertuig (de elektrische bus op *battery packs*) zijn de tunnel-specifieke aspecten beperkt beschouwd. Bij vervolgonderzoek zou het goed zijn dat alle aspecten die een rol spelen, naast het voertuig en de tunnel zelf, ook het gebruik/gedrag van personen en hulpverleningsmogelijkheden, integraal worden bekeken.

Een dergelijk vervolgonderzoek zou ook breder moeten kijken: er zijn meer alternatieve brandstoffen die voldoen aan de zero-emissie normen. Deze brandstoffen hebben allemaal hun specifieke risico's en consequenties, naast hun specifieke milieuvoordelen.

In het onderzoekstraject zijn relevante stakeholders (het bevoegd gezag, de Omgevingsdienst Noordzeekanaalgebied, en de brandweer) nadrukkelijk betrokken geweest: vanaf het formuleren van uitgangspunten en onderzoeksvragen tot de (voorlopige) conclusies en de (sub)condities. Dat heeft betrokkenheid en draagvlak gecreëerd bij alle partijen, samen hebben we de kennis opgebouwd. In het vervolg zien we grote voordelen van dit soort onderzoek op een dergelijke wijze uit te voeren.

Bibliografie

- Air Resources Board. (2015). *Technology Assessment: Medium- and Heavy-Duty Battery Electric Trucks and Buses (Draft)*. Sacramento, CA: California Environmental Protection Agency (State of California).
- COB, (2016), *Tunnelveiligheid verklaard*, Gouda, 2016.
- Colella, F., Biteau, H., Ponchaut, N., Marr, K., Somandepalli, V., Horn, Q., & Thomas Long, R. (2016). Electric Vehicle Fires. *Proceedings from the Seventh International Symposium on Tunnel Safety and Security* (pp. 629 - 636). Montreal, Canada: Exponent.
- EU, (2004), *European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network*, directive 2004/54/EG.
- GB/T 31484 (2015), *Cycle life requirements and test methods for traction battery of electric vehicle* (China).
- IFV (2016), *Brandveiligheid elektrische bussen* (30 september 2016).
- ISO 6469 en ISO 12405-2 (Functionaliteit).
- ISO 12405-2 Homologatie (systeemniveau): R100.02, (Betrouwbaarheid).
- Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., Lorén, A., & Mellander, B. (2014). Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests. *Journal of Power Sources*(Volume 271), 414-420.
- Lecocq, A., Bertana, M., Truchot, B., & Marlair, G. (2014). *Comparison of the Fire Consequences of an Electric Vehicle and an Internal Combustion Engine Vehicle*. Verneuil-en-Halatte, France: INERIS – National Institute of Industrial Environment and Risks.
- Long, R., Blum, A., Bress, T., & Cotts, B. (2013). *Best Practices for Emergency Response to Incidents involving Electric Vehicle Battery Hazards: A Report on Full-scale Testing Results*. Quincy, MA (USA): The Fire Protection and Research Foundation.
- Mikolajczak, C., Kahn, M., White, K., & Long, R. (2011). *Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment*. Quincy, MA (USA): Fire Protection Research Foundation.
- Oude Wolbers, M., Molenaar, J., Van der Veen, F., Bosma, S., & Meessen, M. (2015). *Brandweeroptreden bij incidenten met batterijen, accu's en brandstofcellen (concept)*. Arnhem: Brandweeracademie - Instituut Fysieke Veiligheid.
- Truchot, B., Fouillen, F., & Collet, S. (2016). An Experimental Evaluation of the Toxic Gas Emission in Case of Vehicle Fires. *Proceedings from the Seventh International Symposium on Tunnel Safety and Security* (pp. 419 - 429). Montréal, Canada: SP Technical Research Institute of Sweden.
- UN38,3 - UL 1642 - QC/T (743) 2006 *Standard for Lithium Batteries* (Beschadiging door extern geweld en elektrisch "misbruik").
- WARVW, (2013), *Wet aanvullende regels veiligheid wegtunnels*.

