

Brandveiligheid van elektrische bussen



Instituut Fysieke Veiligheid
Expertisecentrum
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.ifv.nl
info@ifv.nl
026 355 24 00

Colofon

Opdrachtgevers: Stadsregio Amsterdam en Amsterdam Airport Schiphol
Titel: Brandveiligheid van elektrische bussen
Datum: 30 september 2016
Status: Definitief
Versie: 1.2
Auteurs: dr. ir. Nils Rosmuller
Tamo Vogel, MSc
Projectleider: dr. ir. Nils Rosmuller
Review: dr. ir. Ricardo Weewer
Eindverantwoordelijk: dr. ir. Nils Rosmuller

Voorwoord

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's dragen daar aan bij, maar ook steeds duurzamere brandstoffen en alternatieven in het openbaar vervoer leveren hun bijdrage. Dat is natuurlijk goed nieuws. De keerzijde van deze medaille is dat met innovaties ook mogelijke veiligheidsrisico's worden geïntroduceerd die we soms wel, maar soms ook 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?

Schiphol kent drie eigen tunnels die worden gereviseerd, en staat tegelijkertijd aan de vooravond van de introductie van elektrische bussen op het STER-net. Deze gereviseerde tunnels vereisen een openstellingsvergunning afgegeven door de Omgevingsdienst. Dat hiertoe de veiligheid goed geregeld moet zijn is evident. Deze rapportage verschaft de eerste bouwstenen voor de duiding van de risico's van elektrische bussen in tunnels. Deze eerste duiding heeft geresulteerd in condities die opgenomen kunnen worden in de aanbesteding voor aanschaf van elektrische bussen. Het IFV prijst zich gelukkig met deze ontwikkeling van verduurzaming van het verkeer en vervoer in Nederland. Het IFV is verheugd hieraan bij te kunnen dragen door inzicht te verschaffen in de veiligheidsconsequenties van dergelijke innovaties. Het IFV is de opdrachtgever, Stadsregio Amsterdam en Amsterdam Airport Schiphol, dan ook zeer erkentelijk voor het gegeven vertrouwen om deze opdracht te mogen uitvoeren.

Inhoud

1	Aanleiding en aanpak	5
2	'Nieuwe' gevaren bij elektrische bussen	8
3	Soorten battery packs	9
3.1	NiMH-accu's	9
3.2	Li-ion batterijaccu's	10
3.3	Nieuwe batterij-technieken	12
4	Risico's en veiligheid	13
4.1	Thermal runaway	13
4.2	Brandgegevens Li-ion batterijen	14
4.3	Vrijkomen van gevaarlijke stoffen	21
4.4	Incidentbestrijding	23
4.5	Vergelijking elektrische bus met dieselbus	26
5	Conditie	29
5.1	Hoofdconditie	29
5.2	Subcondities	29
6	Conclusie	33
	Referenties	34

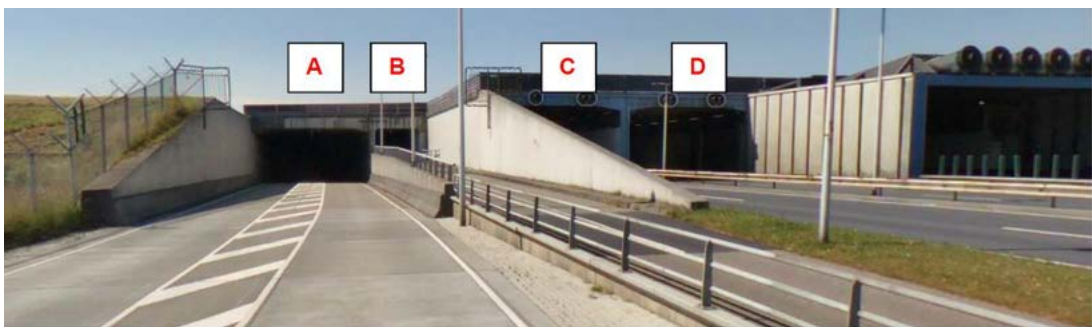
1 Aanleiding en aanpak

In de regio Amsterdam wil men omwille van duurzaamheid de streekbussen door middel van *battery packs* aan laten drijven (elektrisch). De Veiligheidsregio Kennemerland (VRK) heeft zo zijn zorgen geuit over de veiligheid van dergelijke bussen in de Buitenveldertunnel van Schiphol: bepaalde zaken zijn onbekend, dan wel onzeker. Die zorg is begrijpelijk¹: *onbekend maakt onbemind*. Te denken valt aan gevaren van de bussen zelf, zoals elektrocutiegevaar, de moeilijke bereikbaarheid van de *battery packs* om te blussen en de toxische verbrandingsproducten in de brandgassen zoals waterstoffluoride. Bij typische tunnelinvloeden wordt gedacht aan gevaren als de beperkte werkruimte, de potentieel hogere concentratie van toxische brand- en rookgassen en de grote hoeveelheid bluswater die gedurende lange periode beschikbaar moet zijn.

De Diensttunnel is in 1966 gebouwd en ligt direct naast de tunnel in de A4. De tunnel is bestemd voor lokaal en regionaal verkeer dat er met een snelheid van maximaal 70 km/u doorheen mag. Het gesloten deel van de tunnel is 520 meter lang en heeft twee gescheiden tunnelbuizen met elk twee rijstroken. De tunnel is voor het eerst gerenoveerd in de periode 1988-1992.

Het huidige Buitenveldertunnelsysteem bestaat uit een viertal tunnelbuizen, te weten A) de huidige Buitenveldertunnel, B) de fietstunnel, C) de huidige Diensttunnel Oost en D) de huidige Diensttunnel West. De Buitenveldertunnel is een vrije busbaan die onder de Buitenveldertbaan loopt. De tunnel is in 2000 gebouwd en heeft een gesloten deel van 480 meter lang. De tunnel heeft twee rijstroken (gescheiden door een middenberm) en tegengesteld verkeer. Per rijrichting gaan er 40 bussen per uur door de tunnel. De maximumsnelheid is 70 km/u.

De naast elkaar gelegen tunnels met hun gebruik zijn hieronder weergegeven:



Figuur 1: Het huidige Buitenveldertunnelsysteem.

Deze situatie wordt aangepast. Per 1 mei 2019 zal een tunnelconfiguratie gerealiseerd zijn, en mits voorzien van openstellingsvergunning, die bestaat uit een andere configuratie. De configuratie van buizen die thans wordt voorbereid, en waarvan de opdrachtgevers van voorliggende rapportage (de Stadsregio Amsterdam en Amsterdam Airport Schiphol geen voorstander zijn²) betreft 4 buizen:

¹ Anderzijds rijden er thans ook personenvoertuigen en vrachtwagens op *battery packs*.

² Onder meer vanwege exploitatie-redenen en de 'complexe' verkeerssituatie direct voor het Buitenveldertunnelsysteem.

- > Een buis A (2 rijstroken in dezelfde richting) voor verkeer van Amsterdam naar Schiphol. Eén van de rijstroken is exclusief bestemd voor busvervoer (elektrisch en conventioneel), de andere rijstrook voor het verkeer van het onderliggende wegennet (waaronder vrachtverkeer). De rijstroken worden van elkaar gescheiden door een doorgetrokken witte lijn.
- > Een buis B, voor fietsers.
- > Een buis C en D, idem als buis A, voor verkeer van Schiphol in de richting Amsterdam. De rijstroken worden echter elkaar gescheiden door een tussenwand tussen de busstrook (buis C) en buis D voor regulier autoverkeer van het onderliggende wegennet (waaronder vrachtverkeer).

De onderstaande afbeelding schetst de in voorbereiding zijnde toekomstige situatie.



Figuur 2: Toekomstige configuratie in voorbereiding van het Buitenvelderttunnelsysteem.

Geopend per 1 mei 2019 houdt in dat er een openstellingsvergunning is afgegeven door de Omgevingsdienst Noordzeekanaalgebied (ODNZKG). Dit betekent dat de tunnels 'veilig' moeten zijn. Een veilige tunnel wordt op tal van aspecten in samenhang gerealiseerd. Op hoofdcategorieën gaat het om techniek, organisatie en gedrag.

- > **Techniek:** Allereerst is er in Nederland de Tunnelwet met eisen aan die veiligheid en hieronder de van kracht zijnde tunnelstandaard. Deze standaard stelt ontwerpeisen aan tunnels, al naar gelang het gebruik van de tunnel. Denk hierbij bijvoorbeeld aan vluchtdeuren, hulpkasten en installaties (ventilatie, oproepsystemen, etc.).
- > **Organisatie:** veiligheid van de tunnel wordt ook bepaald door de beheersorganisatie (welke afspraken zijn er gemaakt omtrent onderhoud, inspecties, hulpverlening, ...) en het gebruiksregiem (wat mag er wel door aan voertuigen, in welke mate en met welke snelheden).
- > **Gedrag:** Tot slot wordt de veiligheid ook beïnvloed door het gedrag van mensen die gebruik maken van de tunnel zoals weggebruikers, maar zeker ook in dit geval, relevant specifieke doelgroepen zoals buschauffeurs.

Deze rapportage spitst zich toe op (slechts) een deelfacet van die tunnelveiligheid, namelijk de techniek van vervoermiddelen, te weten de veiligheidsgevolgen van het rijden van bussen voor personenvervoer, met battery packs als energiebron voor de aandrijving, verder elektrische bussen genoemd.

De gevaren, en het inzicht in de consequenties van elektrische bussen dienen duidelijk te zijn opdat hiertoe condities gesteld kunnen in de aanbesteding³ voor het rijden van streekbussen op battery packs. Deze eerste verkenning levert de aanzet voor deze te stellen condities in de aanbesteding voor de aan te schaffen 39 bussen.

De volgende vragen staan centraal in deze rapportage:

1. Wat zijn extra dan wel andere risico's als gevolg van elektrische bussen (*battery pack*) ten opzichte van dieselbussen in tunnels?
2. Welke condities ten behoeve van de (brand)veiligheid van elektrische bussen in de Buitenveldertunnel wordt geadviseerd op te nemen in de aanbesteding?

Om de boven gestelde vragen te beantwoorden hanteren we de volgende redeneerlijn. Als eerste bekijken we welke extra, dan wel andere risico's bussen aangedreven op *battery packs* veroorzaken ten opzichte van bussen aangedreven op diesel. We bezien aan de hand van literatuur welke typen van batterijen gebruikt worden in het busvervoer van personen, en welke risico's met de meest gebruikelijke *battery pack* samenhangen.

Op de meest typische en meest cruciale risico's hiervan, zijnde de *thermal runaway*, zullen we vervolgens de verdere studie gaan richten. Elektriciteit/spanning als speciaal risico van elektrische bussen is in redelijke mate al standaard afgedekt door hoog voltage relais die uitslaan bij contactonderbreking, veelal gekoppeld aan botsensoren.

Vervolgens zullen we kijken naar de faalmechanismen die kunnen leiden tot de *thermal runaway*. Die mechanismen zijn:

- > Brand in (onderdelen van) de bus zelf.
- > Aanrijding van bus met zwaar wegvoertuig.
- > Falen van een cel in het battery pack van de elektrische bus.

Brandgegevens van de meest gangbare battery pack in bussen, Lithium-ion battery packs, zijn echter niet zonder meer beschikbaar dan wel toepasbaar. Met resultaten van de extrapolatie zullen we vervolgens de veiligheidsrisico's van elektrische bussen kwalitatief (beter dan, minder goed dan) vergelijken met dieselbussen. Dit gebeurt op een aantal aspecten, te weten:

- > de scenario kans (op ongevalsscenario 'brand van de brandstof')
- > brandontwikkeling
- > toxiciteit van gassen bij brand
- > spanning op voertuig bij brand
- > carcinogeniteit van gassen bij brand
- > bestrijdbaarheid: bereikbaarheid, bluswater hoeveelheid en afvalwater.

Op basis van deze vergelijkingen hetgeen uit de literatuurstudie boven tafel is gekomen, worden condities geformuleerd welke in de aanbesteding opgenomen kunnen worden.

³ Maar ook rekening mee kan worden gehouden in het tunnelontwerp en de incidentbestrijdingsprocedures.

2 ‘Nieuwe’ gevaren bij elektrische bussen

Het gebruik van energie uit battery packs voor de aandrijving van bussen in plaats van diesel als brandstof, levert een aantal specifieke gevaren op. Het meest prominente extra gevaar van bussen aangedreven door battery packs zit in deze battery packs zelf. Daarnaast speelt het gevaar van elektriciteit en mogelijk contact met spanning. De kans dat de carrosserie onder spanning komt te staan is echter klein. Systemen van moderne voertuigen zijn over het algemeen erg goed geïsoleerd en moeten al volledig beschadigd raken om gevaar op te leveren; er moet direct contact tussen spanning voerende delen en de carrosserie ontstaan. De schok die een cel bij een botsing te verduren krijgt, kan leiden tot interne beschadiging van de cel. Het gedrag van de accupacks onder extreme omstandigheden is door leveranciers getest en onderzocht. De behuizing van de accupack is over het algemeen zodanig sterk ontworpen dat de kans op zware beschadiging van de cellen behoorlijk klein is (Brandweeracademie, 2015). Daarnaast wordt het gevaar van elektriciteit en spanning standaard afgedekt door hoog voltage relais die uitslaan. Deze systemen zijn veelal gekoppeld aan botsensoren. Met inachtneming van de standaard veiligheidsprocedures is het extra gevaar van elektriciteit/spanning dus beperkt (Brandweeracademie, 2015). De gebruikte materialen voor aankleding en interieur van de bussen zullen geen grote verschillen opleveren met de huidige situatie en blijven dan ook buiten deze analyse.

Het betrokken raken van het battery pack bij brand en het optreden van een ‘thermal runaway’ is het essentiële veiligheidsverschil. Over het algemeen ontstaat brand in bussen op drie verschillende manieren:

- > Brand in (de constructie van) de bus zelf dan wel in het motorgedeelte van de bus
- > Aanrijding van de bus met een ander (zwaar) wegvoertuig waarbij brand uitbreekt
- > Bij elektrische bussen: het falen van een batterij cel/battery pack.

In de verdere rapportage wordt vooral gekeken naar het specifieke gevaar dat elektrische bussen opleveren met betrekking tot het ontstaan en ontwikkelen van brand. De bijzondere gevaren die elektrische bussen opleveren bij bijvoorbeeld technische hulpverlening door de brandweer worden buiten beschouwing gelaten.

3 Soorten battery packs

Er zijn verschillende typen battery packs (accubatterijen) die toegepast worden in elektrische en hybride voertuigen. 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 dienen te kunnen voldoen. Denk hierbij aan Amerikaanse, Europese en ook aan Chinese normeringen. Hierin worden randvoorwaarden gesteld voor overstrom, overspanning, punctie, externe hitte, lekkage, ventileren bij hoge temperaturen et cetera. Via normering kunnen de volgende gebieden vrijwel volledig worden afgedekt:

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

In deze rapportage gaan we niet nader in op bestaande normering van de battery zelf. We richten ons in deze rapportage op de brandveiligheid van de battery pack in de bus, en de brandveiligheid van de elektrische bus in de tunnel.

Een battery pack bestaat uit meerdere losse cellen die de energie en het vermogen leveren aan elektromotoren welke op hun beurt de bus weer in beweging zetten. Een bekende accu waarover bijna alle hedendaagse voertuigen beschikken zijn loodaccu's in de vorm van 12- of 24-volt accu's (Brandweeracademie, 2015). Voor het volledig elektrisch laten rijden van (zware) voertuigen zijn loodaccu's minder geschikt. Loodaccu's zijn namelijk zwaar en kennen de laagste energiedichtheid van verschillende oplaadbare accu's. Voor de toepassing in elektrische voertuigen zijn Nikkel-metaal-hydride (NiMH) en Lithium-ion (Li-ion) accu's meer relevant. Door het in serie schakelen van verschillende aantallen van deze type cellen worden high power accubatterijen gerealiseerd die gebruikt kunnen worden bij elektrische voertuigen. Het aantal cellen in één enkele accubatterij kan daarbij variëren van 20 tot 100 cellen, waarbij een voertuig één of meerdere accubatterijen kan bevatten (Brandweeracademie, 2015). Hiervoor worden gesloten NiMH-accu's en Li-ion accu's toegepast. Beide worden hieronder nader toegelicht.

3.1 NiMH-accu's

De nikkel-metaalhydride-accu (NiMH) is een oplaadbare cel op basis van nikkel en een metaalhydride. Het maakt gebruik van het elektrolyt kaliumhydroxide wat een zeer bijtende pasta is. Vergelijken met de lithium-ion-accu is de energiedichtheid van NiMH-accu's lager en de zelfontlading hoger (Brandweeracademie, 2015).

Tabel 1: Overzicht van enkele voor- en nadelen NiMH-accu's (bron: (Brandweeracademie, 2015))

Type accu	Voordelen	Nadelen
Nikkel-metaal-hydride (NiMH)	<ul style="list-style-type: none"> > Hogere energiedichtheid dan loodaccu's. > Bevatten geen giftig cadmium. > Diep ontladen en overladen is geen probleem. 	<ul style="list-style-type: none"> > De energiedichtheid is lager dan een Li-ion-accu en de zelfontlading is hoger. > Batterij kan niet goed tegen hoge (raakt beschadigd) en lage temperaturen (ontlading). > Bevatten bijtende, basische kaliumhydroxide (KOH in pasta, GEVI: 80). > Mogelijk vrijkomen waterstofgas, GEVI: 23.

NiMH batterij worden vooral toegepast in hybride voertuigen (Middelkoop, 2013). NiMH type batterijen zijn vooral effectief toegepast bij lichte voertuigen. Voor medium- en zwaar gebruik zijn de batterijen minder geschikt vanwege hun beperkte vermogen in relatie tot hun gewicht. Meer batterijen om het vermogen en daarmee bereik te vergroten is vaak niet rendabel in verband met een grote toename van het gewicht waardoor een bus of vrachtwagen minder (laad-)capaciteit krijgt. Voor de toepassing van elektrische bussen zijn dan ook Li-ion batterijaccu's meer geschikt en toegepast (Air Resources Board, 2015, pp. II-4 - II-5).

3.2 Li-ion batterijaccu's

Li-ion is een verzamelnaam voor een verscheidenheid aan batterijen die lithium-ionen gebruiken bij het opslaan en leveren van energie. De Li-ion batterijen worden op dit moment het vaakst gekozen voor toepassing bij lichte- en zware voertuigen en zijn in de markt breed beschikbaar (Air Resources Board, 2015, pp. II-5). De lithium power technologie is veel jonger dan de NiMH power technologie en wordt steeds meer toegepast. Lithium-ion accu's kennen een relatief hoge energiedichtheid en zijn mede daarom populair. Deze accu's worden vaak specifiek voor een apparaat gemaakt omdat er een regelsysteem aan gekoppeld moet zijn om te diepe ontlading te voorkomen. Dit type accu's kunnen halogeenen/of zwavelhoudende stoffen (bv. thionylchloride, SOCl_2) bevatten. Een Li-ion accu bevat relatief veel brandbare stoffen (metallisch lithium en oplosmiddelen) die bij een verhoogde temperatuur brandbare gassen vormen en daarmee een gevaar opleveren. Door opwarming verdampt vloeibaar elektrolyt naar gas waardoor de accu opzwellt en open kan barsten. Bij het vrijkomen van de damp kunnen dan schadelijke stoffen vrijkomen en flinke steekvlammen ontstaan (Brandweeracademie, 2015, pp. 17-21).

Tabel 2: Overzicht van enkele voor- en nadelen Li-ion accu's (bron: Brandweeracademie, 2015)

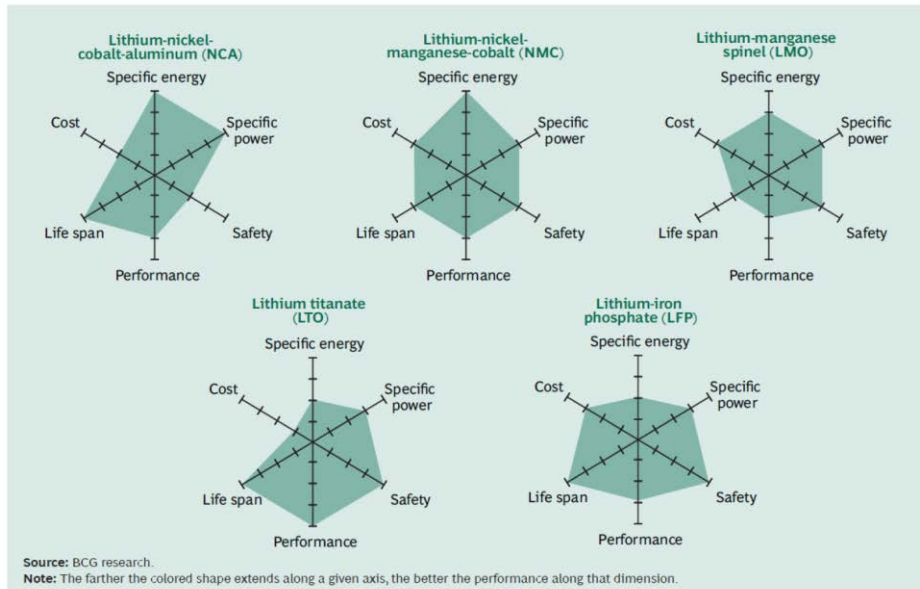
Type accu	Voordelen	Nadelen
Lithium-ion (Li-ion)	<ul style="list-style-type: none"> > Hoogste energiedichtheid (t.o.v. lood en NiMH), op de lithium-ion-polymeer-accu na. > Geringe zelfontlading (alleen door geïntegreerd regelsysteem). > Hoog vermogen (sterk afhankelijk van kathodemateriaal). > Milieuvriendelijker dan andere batterijen. 	<ul style="list-style-type: none"> > Hebben een hoge kostprijs. > Gevoelig voor overladen en over-ontladen. > Explosie en brand mogelijk door hoge temperaturen (kritische temperatuur ± 110 °C). > Bevatten relatief veel brandbare stoffen. > Niet-oplaadbare professionele batterijen kunnen zwavel- en/of halogeen houdende stoffen bevatten.

Een variant op de Li-ion batterijen is de **Lithium-ion-polymeer-accu (Lipo-batterij)**. Het verschil met de lithium-ion accu is dat het elektrolyt nu is opgelost in een polymeer. Deze accu's hebben een lage interne weerstand waardoor ze een hoge stroom kunnen afgeven. Bij verkeerd laden kan de temperatuur behoorlijk oplopen en kan de accu in brand vliegen of exploderen.

Er zijn verschillende type Li-ion batterijen beschikbaar die verschillen in (chemische) samenstelling. In de literatuur zijn de volgende varianten met kenmerken gevonden (Air Resources Board, 2015, pp. II-5 t/m II-8) & (Battery University, 2016):

- > Lithium-ijzer-fosfaat batterijen (LFP of LiFePO_4): In deze batterijen is een organische oplossing met lithiumzout in gebruik als elektrolyt. Door het gebruik van fosfaat als positieve elektrode wordt het potentieel op thermal runaway significant verlaagd wat de veiligheid van de batterij ten goede komt.
Thermal runaway bij $\pm 270^\circ\text{C}$
- > Lithium-Titanate batterijen (LTA of $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$): Deze types gebruiken een niet-waterig elektrolyt. Hoewel het een lage energiedichtheid heeft in vergelijking met andere Li-ion batterijen, kunnen ze wel veilig gebruikt worden binnen een groot gedeelte van de batterijcapaciteit en laden ze zeer snel op. De batterijen hebben een verhoogde stabiliteit en bieden daarmee meer bescherming tegen overladen.
Thermal runaway bij ? (een van de veiligste batterijen)
- > Lithium-Nikkel-Mangaan-Kobalt Oxide – Batterijen (NMC of $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$): Deze batterijen hebben betere eigenschappen op het gebied van energie en levensduur waardoor het bereik over het algemeen wat hoger ligt. Deze batterij komt terug in veel lichtgewicht elektrische voertuigen en is mede populair door lage zelfopwarming.
Thermal runaway bij $\pm 210^\circ\text{C}$
- > Lithium-Nikkel-Kobalt-Aluminium – batterijen (NCA of LiNiCoAlO_2) Dit is een batterij die steeds populairder worden in treinen en voor energieopslag. Ze hebben een hoge energiedichtheid en goede levensduur, maar is niet zo veilig als de andere batterijen. In auto's moet deze batterij voorzien worden van veiligheidsmaatregelen die de prestatie en gedrag van de batterijen monitoren om veiligheid beter te borgen.
Thermal runaway bij $\pm 150^\circ\text{C}$
- > Lithium-Mangaan-Oxide – batterijen (LiMn_2O_4): Deze batterijen kennen een relatief hoge thermische stabiliteit en zijn daarmee relatief veilig. De energie-prestaties liggen over het algemeen wat lager.
Thermal runaway bij $\pm 250^\circ\text{C}$
- > Lithium-Kobalt-Oxide – batterijen (LiCoO_2): Deze batterijen kennen relatief een hoge opslagcapaciteit maar moeten vaak opgeladen worden. Ook zijn deze batterijen niet zo veilig als andere types.
Thermal runaway bij $\pm 150^\circ\text{C}$

Elk batterij heeft zijn voor- en nadelen ten opzichte van de andere types. Dit geldt ook op het gebied van veiligheid. De lithium-titanate en lithium-ijzer-fosfaat batterijen zouden volgens de Air Resources Board (2015) het meest veilig zijn in het gebruik.



Figuur 3: Vergelijking van meerdere eigenschappen tussen verschillende Li-ion batterijen (Air Resources Board, 2015, pp. II-8)

3.3 Nieuwe batterij-technieken

Enkele relatief nieuwe en opkomende batterij-technieken zijn *Lithium-Air batterijen*. Het grootste potentiële voordeel van Li-air-technologie is de grote energiedichtheid, die theoretisch vergelijkbaar is met traditionele benzine (13 kWh/kg). Door zuurstof uit de lucht te gebruiken en niet de oxidator in de batterij te huisvesten, kan deze energiedichtheid behaald worden. Op dit moment zijn deze batterijen nog niet stabiel en daarom ook niet veilig (Air Resources Board, 2015, pp. II-8).

Een andere techniek die nu al wordt toegepast zijn zogenaamde *ZEBRA-batterijen* (Na-NiCl₂). Deze batterijen gebruiken een gesmolten zoutmengsel als elektrolyt en wordt nu toegepast op enkele 'medium-duty' voertuigen en ook al enkele 'heavy-duty' voertuigen (Air Resources Board, 2015, pp. II-8). Om het zout in gesmolten toestand te houden bevat elke cel een warmtebron om de cel te verhitten tot de werktemperatuur van 245°C. De batterijen leveren uitstekende prestatie en hebben een behoorlijk lange levensduur. Nadeel is dat de batterijen ook in rust een temperatuur moeten houden van 245°C waardoor de batterijen minder effectief worden (Middelkoop, 2013).

Op dit moment en voor de nabije toekomst lijken Li-ion batterijen het meest geschikt voor toepassing in grote voertuigen zoals elektrische bussen. Daarom zijn vooral de veiligheidsaspecten van deze batterijen hieronder nader onderzocht om een beeld te schetsen van risico's bij het passeren van de Buitenveldertunnel.

4 Risico's en veiligheid

Elektrische voertuigen kennen bepaalde risico's. In het rapport van Long et al. (2013) naar elektrische voertuigen worden deze gevaren opgesplitst in drie verschillende categorieën. Allereerst zijn er *chemische* gevaren vanwege de gevaarlijke stoffen die in batterijen gebruikt worden. Daarnaast leveren batterijen *elektrische* gevaren op. Batterijen leveren immers spanning en wanneer meerdere batterijcellen in serie met elkaar worden geschakeld kunnen grote vermogens bereikt worden die gevaar kunnen opleveren bij contact met onder spanning staande delen. Als laatste leveren batterijen *thermische* gevaren op. De batterijen kunnen heet worden, temperatuursverhoging zelf in stand houden (thermal runaway) en uiteindelijk in brand vliegen of veroorzaken (Long, Blum, Bress, & Cotts, 2013). In het volgende gedeelte zullen de gevaren van Li-ion nader worden besproken waarbij wordt gefocust op thermische en chemische gevaren.

4.1 Thermal runaway

Misschien wel het grootste gevaar van Li-ion batterijen is het optreden van 'thermal runaway'. Thermal runaway is een falingsmechanisme dat leidt tot zelfverhitting in een batterij wat kan resulteren in brand (Colella, et al., 2016). Een falende batterij kan het gevolg zijn van een ontwerp of productiefout waarbij de elektrode, separator, elektrolyt of onderlinge processen bij betrokken zijn. Over het algemeen komen deze fouten weinig voor en wanneer deze ontdekt worden, worden vaak batterijen teruggeroepen om de fout te herstellen. Een batterij kan ook falen door externe factoren zoals het verkeerd gebruiken van een batterij of blootstelling aan (extreme) omstandigheden. Deze fouten zijn moeilijk in een faalkans te benoemen (Battery University, 2016). Li-ion batterijen zijn in de afgelopen jaren behoorlijk verbeterd maar over de faalkans zijn verschillende cijfers terug te vinden. Zo wordt door Larsson et al. (2016) gesproken over een faalkans van één per miljoen of lager terwijl op de website van MIT Technology review wordt gesproken over een faalkans van ongeveer 1-op-100 miljoen (Massachusetts Institute of Technology, 2013). Al met al lijkt het een lage kans te zijn, maar hierbij moet wel rekening worden gehouden dat bij gebruik van veel batterijen de kans op een falende batterij vergroot wordt. De verwachting is dat batterijveiligheid steeds verder wordt verbeterd en faalkansen verder terug worden gebracht (Battery University, 2014).

Er zijn *geen intrinsiek veilige* Li-ion batterijen. Intrinsiek veilig houdt in dat de battery pack zodanig ontworpen is, dat het vrijkomen van voldoende energie voor zelfontbranding van wordt voorkomen. Battery packs hebben allemaal hun eigen 'safety window': een veiligheidsmarge die, wanneer condities hier buiten komen, kunnen leiden tot het zichzelf opwarmen en een thermal runaway veroorzaken (Air Resources Board, 2015). Temperaturen waarbij dit op kan treden liggen, afhankelijk van het type batterij, gemiddeld tussen ca 55 en 250°C (Brandweeracademie, 2015). Bij thermal runaway van een batterij cel komen brandbare gassen vrij doordat het vloeibare elektrolyt omgezet wordt in gassen. Deze gassen kunnen, wanneer deze zich in een besloten ruimte zoals een 'pouch' of cassette bevinden, onder (hoge) druk vrijkomen en daarbij schade veroorzaken.

Een gevaar is dat de gassen die vrijkomen, brandbaar zijn en bij voldoende zuurstof en een ontstekings temperatuur (de temperatuur van de cel verpakking kan hiervoor hoog genoeg zijn) tot ontbranding kunnen komen (Mikolajczak, Kahn, White, & Long, 2011).

Thermal runaway wordt veroorzaakt door een stijging in temperatuur van een batterij cel. Deze stijging kan o.a. plaatsvinden door (Colella, et al., 2016):

- > Blootstelling aan vuur
- > Storing in het (thermal) batterijmanagementsysteem
- > Interne kortsluiting door defect in een individuele cel
- > Een fout (spanningsgolf) tijdens het opladen (of ontladen) van de cel
- > Slechte onderlinge connectie tussen de batterijen (levert meer weerstand en daardoor hitte op)
- > Mechanische schade veroorzaakt door buitenaf.

Thermal runaway is de meest gangbare vorm van een (catastrophic) falingsmechanisme dat kan leiden tot brand in batterijen. Thermal runaway in een enkele batterij cel kan door opwarming een kettingreactie veroorzaken door het opwarmen van naastgelegen cellen welke vervolgens ook in een thermal runaway geraken. Een effectieve bestrijdingsmanier vereist dat het blusmiddel in contact komt met de batterijcellen om een zo groot mogelijk koelingseffect te hebben en de kettingreactie naar andere cellen te vertragen of te voorkomen (Colella, et al., 2016). In het document van Air Resources Board (2015) wordt aangegeven dat er volgens 'een producent' Li-ion batterijen bestaan waar geen thermal runaway in kan optreden; zelfs niet bij doorboring, onderdompeling, verhitting, samenpersen of blootstelling aan vlammen (Air Resources Board, 2015, pp. II-5).

4.2 Brandgegevens Li-ion batterijen

Gesteld wordt dat een thermal-runaway het grootste gevaar is dat op kan treden bij Li-ion batterijen. Wanneer een battery pack in brand vliegt of bij een brand betrokken raakt, draagt het bij aan het totale brandvermogen. Hoe groot deze bijdrage is kan op meerdere manieren weergegeven worden. In deze eerste verkenning van beschikbare literatuur zijn geen gegevens gevonden over full-scale testen waarbij battery packs zijn gebruikt met een grootte zoals deze toegepast worden in bussen. Wel zijn er enkele onderzoeken en gegevens gevonden met betrekking tot experimenten variërend van een enkele cel tot aan battery packs zoals deze toegepast worden in personenauto's. Waar mogelijk worden deze gegevens indicatief geëxtrapoleerd naar de grootte van battery packs zoals deze toegepast worden in het busvervoer. Dit is indicatief omdat er tal van mitsen en maren zitten aan lineaire extrapolatie die onvoldoende bekend zijn, maar tevens indicatief omdat op deze wijze wel een eerste beeld van fysische effecten wordt gecreëerd. De capaciteiten van battery packs in het busvervoer kunnen net als bij personenauto's verschillen en zijn afhankelijk van bijvoorbeeld het benodigde bereik, mogelijkheden tot opladen, benodigde snelheid en vermogen. Zo worden in het document van de Air Resources Board (2015) capaciteiten gevonden die uiteen liggen van 83 kWh voor een schoolbus tot 590kWh voor een (grote) streekbus. Om enkele gevonden resultaten in het onderzoek te vergelijken met een bus is redelijkerwijs een capaciteit van de bus aangenomen van 250kWh. Daarbij moet benadrukt worden dat deze gekozen waarde en doorgetrokken resultaten puur ter indicatie zijn en andere batterij capaciteiten en types andere resultaten kunnen opleveren.

Op de volgende belangrijke veiligheidsindicatoren wordt hieronder nader ingegaan:

- > Volume van vrijkomende gassen
- > Heat release rate
- > Vrijkomen van energie
- > Straling en temperatuur.

Elke paragraaf wordt afgesloten met een conclusie over de betekenis voor het busvervoer met battery packs.

4.2.1 Volume vrijkomende gassen en ontbrandingsgrenzen

Wanneer cellen bij brand of door thermal runaway verhit worden ontstaan er brandbare gassen binnen de cel. Deze brandbare gassen kunnen niet uit de cel ontsnappen waardoor de druk toeneemt. Sommige cellen beschikken over overdrukbeveiliging die bij een bepaalde druk gassen laat ontsnappen om zo deze druk te verlagen. Bij andere cellen (zoals pouch cells) ontbreekt dit en zullen de gassen op zwakke plekken vrijkomen (vaak de aansluitpunten van de cellen of bij de naden van een cel) (Colella, et al., 2016).

Colella et al. (2016) hebben experimenten uitgevoerd met Li-ion cellen (type LiCoO₂) met een vermogen van 7,7Wh. Uit het onderzoek van Colella et al. (2016) blijkt dat hoe 'voller' (meer opgeladen) een batterij is, hoe meer gassen er uit de batterij vrijkomen. Hierbij gaat het niet om een lineair verband. Zo blijkt uit een test dat bij een volle batterij (100%) een ongeveer 3 keer zo groot volume aan gassen vrijkomt dan bij een halfvolle batterij (50%). In onderstaande tabel zijn de resultaten voor verschillende oplaadpercentages weergegeven:

Tabel 3: Vrijkomend volume aan gassen bij verhitten Li-ion cel (Colella et al. 2016)

Oplaadpercentage	Volume aan vrijkomende gassen	Volume per Wh
50%	0.8 Liter	0.10 Liter per Wh
100%	2.5 Liter	0.33 Liter per Wh
150%	6.0 Liter	0.78 Liter per Wh

In hetzelfde onderzoek is ook onderzocht wat de explosiegrens⁴ is van de vrijkomende gassen. De explosiegrenzen van het vrijkomende gas lagen hierbij tussen de 6% (Lower Explosive Limit) en ±38% (Upper Explosive Limit). Hierbij ging het om een volledig opgeladen batterij (SOC: 100%) (Colella, et al., 2016).

Betekenis voor busvervoer

In het onderzoek van Colella et al. (2016) zijn enkele waardes gepresenteerd voor het vrijkomende volume aan gassen bij het verhitten van een Li-ion cel. Op basis van deze gegevens kan er bij een bus met volledig opgeladen (SOC van 100%) battery pack van 250kWh potentieel 82.500 liter aan gassen vrijkomen⁵. Dit komt overeen met een volume van 82,5m³.

⁴ In het rapport van Colella et al. (2016) wordt ontbrandingsgrens als synoniem voor de explosiegrens gehanteerd.

⁵ Deze waarden zijn slechts indicatief. De daadwerkelijke effecten zijn o.a. afhankelijk van het type batterij welke toegepast is, de grootte van deze batterij en hoe vol deze is opgeladen. Ook hoeven verbanden niet altijd lineair te zijn: een twee keer zo grote batterijcapaciteit hoeft dus niet twee keer zo grote effecten op te leveren.

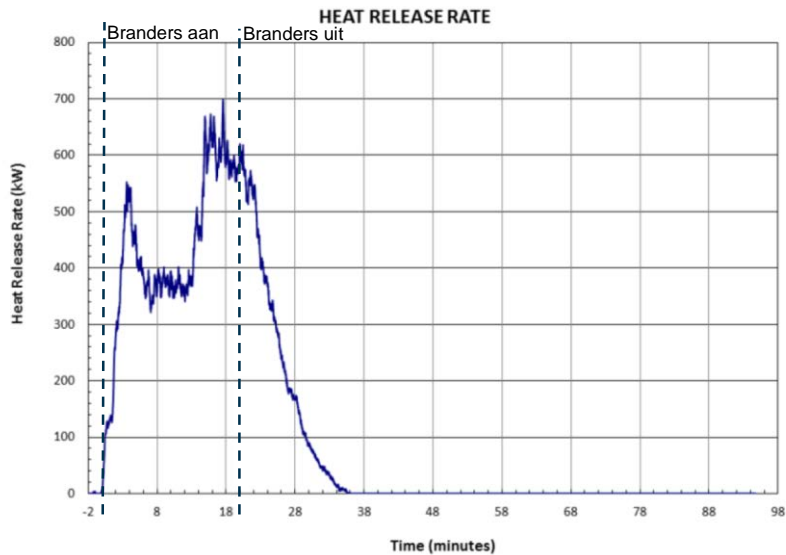
De gassen die vrijkomen uit het elektrolyt bij Li-ion batterijen zijn brandbaar en leveren daarbij gevaar op. De ontbrandingsgrenzen zoals bepaald in het onderzoek van Colella et al. (2016) zullen naar verwachting voor busvervoer dezelfde waarden opleveren: tussen de 6 en 38%⁶. Voor diesel, waar conventionele bussen mee rijden, liggen ontbrandingsgrenzen tussen 0,6 % (LEL) en 7,5 % (UEL) (Shell Trading Rotterdam B.V., 2012). Gassen die voortkomen uit dieselolie zullen dus sneller een explosief mengsel in de lucht opleveren. Wel is het explosiegebied van gassen uit Li-ion batterijen groter dan die van dieselgassen wat vooral een rol gaat spelen als er veel gassen vrijkomen. Er zal nader (literatuur-)onderzoek nodig zijn om uit te zoeken hoe de rookproductie bij een brandend battery-pack zich over tijd verhoudt tot een koolwaterstofbrand. Een eerste indicatie is gevonden in een persbericht van het Duitse instituut DEKRA. Daarin wordt gesteld dat bij door hun uitgevoerde experimenten aanzienlijk minder vlammen én rook geproduceerd werd bij een Li-ion batterij dan bij brandende benzine (DEKRA, 2012).

4.2.2 Heat Release Rate

De brandbaarheid van een product wordt vaak weergegeven door het bepalen van de Heat Release Rate (HRR). Daarbij wordt de HRR gemeten in Joules per seconde oftewel in Watt. Hoe hoger deze waarde hoe meer een product als motor van de brand aanwezig is en daarmee een hogere bijdrage heeft in de brandontwikkeling. De HRR wordt gezien als de belangrijkste parameter om het brandgevaar van een product te bepalen (Colella, et al., 2016).

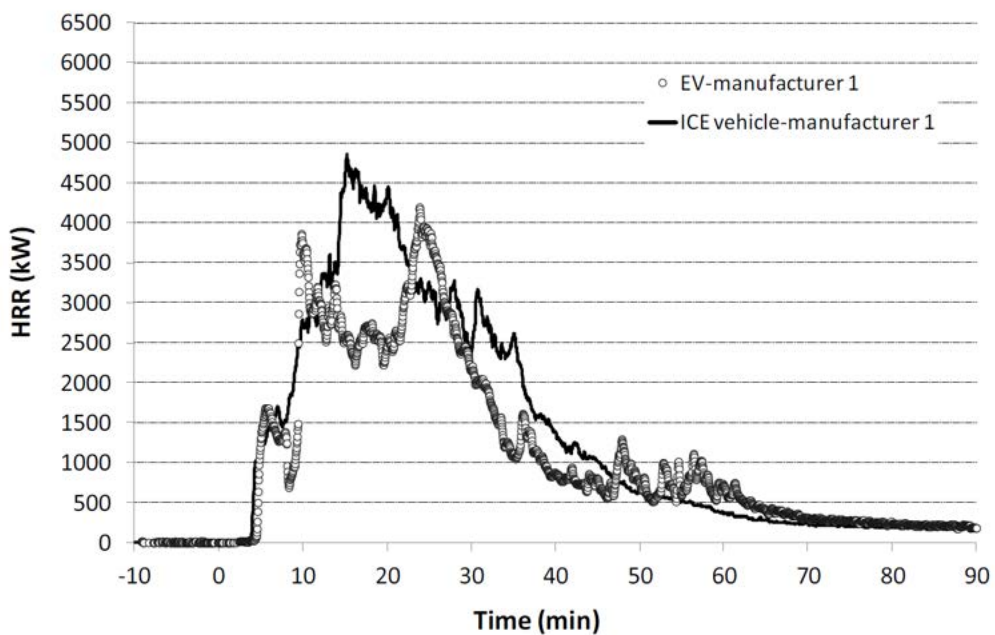
In het onderzoek van Colella et al. (2016) werd bij de 7.7 Wh Li-ion cell die voor 50% was opgeladen, een piek in de HRR bereikt van 18kW. Daarbij heeft zowel de inhoud van de cel alsook de verpakking van de cel deelgenomen aan de verbranding. Ook voor de HRR geldt dat hoe voller een batterij is opgeladen, hoe meer brandvermogen er uit de batterij vrijkomt (Colella, et al., 2016). Ook door Larsson et al. (2014) werd gevonden dat hoe voller een batterij is opgeladen, hoe meer energie er uit vrijkomt bij brand en hoe hoger de HRR is. In dit onderzoek werden HRR-piekwaarden gemeten die uiteenliepen van 13 tot 57kW voor batterijen met een capaciteit van ongeveer 100Wh. Bij het terugrekenen komen de onderzoekers daarmee op maximale HRR-waarden die tussen de 110 en 490Watt (W) per Wattuur ligger (Wh) (Larsson, Andersson, Blomqvist, Lorén, & Mellander, 2014). Er zijn ook enkele 'thermal runaway onderzoeken' gedaan met full-scale battery packs (zij het in personenvoertuigen). Een van deze onderzoeken is een onderzoek van Long et al. (2013) waar een groot battery pack (fully charged Li-ion) van 16kWh in een thermal runaway werd gebracht. Het batterijpakket gaf een piek in vrijkomend brandvermogen (HRR) van ongeveer 300kW. De gemiddelde HRR van de battery pack lag op 128kW over een periode van 90 minuten (zie figuur 4).

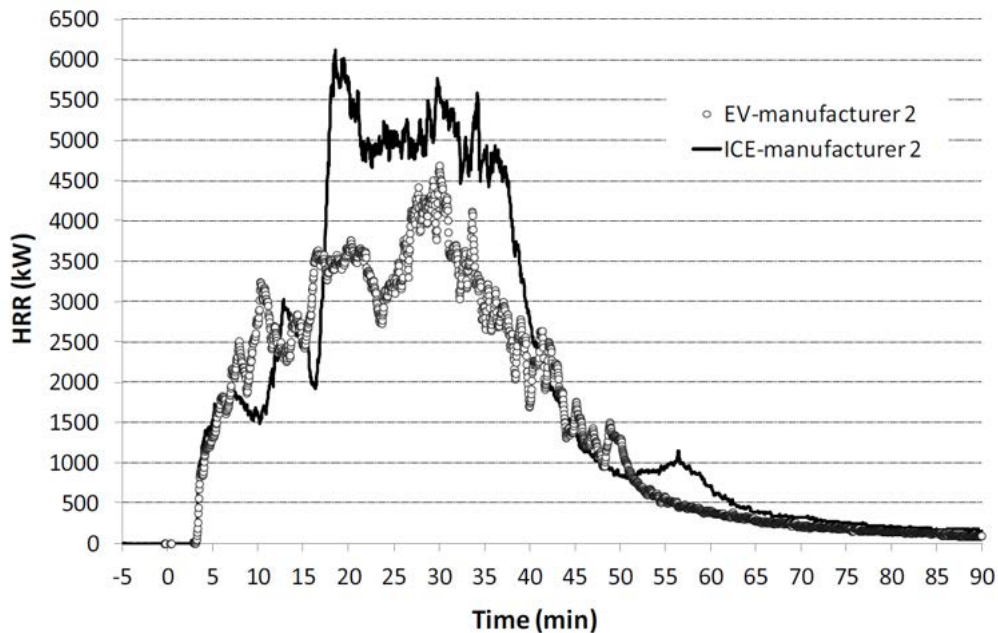
⁶ Deze waarden zijn slechts indicatief. De daadwerkelijke effecten zijn o.a. afhankelijk van het type batterij welke toegepast is, de grootte van deze batterij en hoe vol deze is opgeladen. Ook hoeven verbanden niet altijd lineair te zijn: een twee keer zo grote batterijcapaciteit hoeft dus niet twee keer zo grote effecten op te leveren



Figuur 4: HRR bij verbranding van battery-pack. Let wel, in de eerste 20 minuten staan er propaanbranders aan met een vermogen van 400kW (bron: Long et al. 2013)

In een onderzoek van Lecocq (2012) zijn twee verschillende merken elektrische auto's en twee identieke merken op brandstof rijdende voertuigen met elkaar vergeleken. De eerste elektrische auto beschikte over een battery pack met een vermogen van 16,5 kWh. De tweede beschikte over een battery pack met een vermogen van 23,5kWh. De voertuigen op brandstof waren gevuld met diesel, al is ons niet bekend om hoeveel liter diesel het ging. Bij de twee voertuigen van het eerste automerk was de piek in HRR van het met diesel aangedreven voertuig met 4,8 MW groter dan de HRR van 4,2 MW van het elektrische voertuig. Bij het tweede automerk gaf het elektrische voertuig een maximale HRR van 4,7 MW waar het gelijkende voertuig op diesel een HRR gaf van 6,1 MW (Lecocq, Bertana, Truchot, & Marlair, 2014).





Figuur 5: Het verloop in HRR waarden bij de experimenten van Lecocq et al. (2012) waar een elektrische auto en identieke auto op diesel met elkaar zijn vergeleken.

Collela (2016) verwijst daarentegen naar een onderzoek van Watanabe (2012) waaruit zou blijken dat de HRR van een elektrisch voertuig drie keer zo hoog was als bij een vergelijkbaar voertuig op brandstof. Helaas is het niet gelukt om deze studie te achterhalen.

Betekenis voor busvervoer

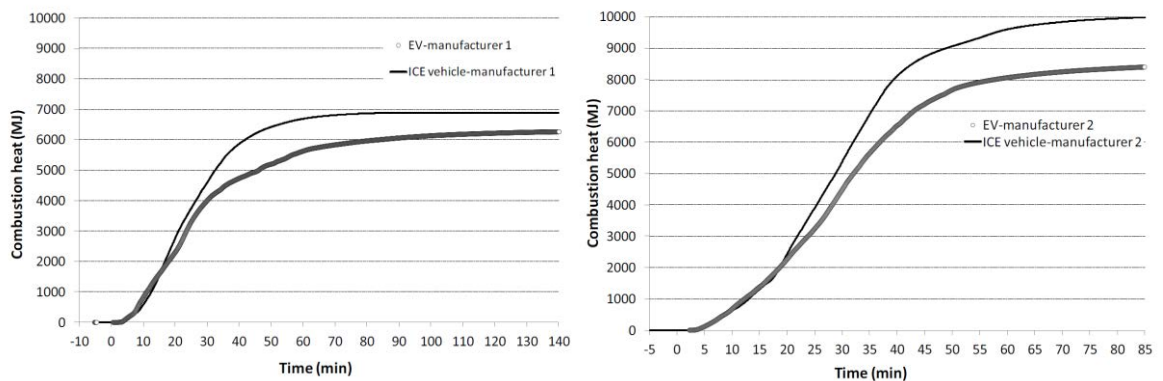
Het is lastig om de cijfers voor de Heat Release Rate te extrapoleren naar de betekenis voor het busvervoer. De waarde van HRR wordt door meerdere specifieke factoren beïnvloed zoals het brandoppervlak en de hoeveelheid zuurstof die aanwezig is om de verbranding in gang te houden dan wel te laten groeien. Wanneer de cijfers van Larsson et al. (2014) (HRR tussen 110 en 490 Watt per Wh) vertaald worden naar de grootte van een battery pack voor een bus met een batterij van 250kWh, levert dit een mogelijke HRR op tussen 27,5 en 122,5 Megawatt⁷. Bij lineaire extrapolatie van de cijfers zoals gevonden in het onderzoek van Long et al. (2013) zou een Li-ion batterij met 250kWh een piek in de HRR geven van ongeveer 4,7 Megawatt en een gemiddelde HRR van 2,0 Megawatt⁷. De verschillende geëxtrapoleerde waarden liggen behoorlijk ver uit elkaar. Meer onderzoek is nodig om tot een betrouwbare HRR-waarde voor een Li-ion battery pack van 250kWh te komen.

Het is lastig om op basis van de huidige beschikbare gegevens de HRR van elektrische bussen te vergelijken met die van dieselbussen. De test van Lecocq et al. (2012) geeft nog het beste inzicht in die vergelijking. Daar gaven voertuigen met een dieseltank 15 tot 30% hogere HRR-waarden in vergelijking met elektrische voertuigen. Het is onze verwachting dat dit ook zou gelden voor het verschil tussen elektrische bussen en dieselbussen: dus een hogere HRR-waarde van dieselbussen in vergelijking met elektrische bussen.

⁷ Deze waarden zijn slechts indicatief. De daadwerkelijke effecten zijn o.a. afhankelijk van het type batterij welke toegepast is, de grootte van deze batterij en hoe vol deze is opgeladen. Ook hoeven verbanden niet altijd lineair te zijn: een twee keer zo grote batterijcapaciteit hoeft dus niet twee keer zo grote effecten op te leveren

4.2.3 Vrijkomen van warmte

Bij het bepalen van het brandvermogen speelt ook de hoeveelheid warmte of energie die bij de verbranding van een product vrij kan komen een rol. In het onderzoek van Larsson et al. (2014) lag de totale hoeveelheid vrijkomende warmte (*Total Heat Release; THR*) bij verschillende Li-ion batterijen tussen 28 en 75 kJ per Wh (Larsson, Andersson, Blomqvist, Lorén, & Mellander, 2014). In het full-scale onderzoek van Long et al. (2013) kwam er bij het battery pack met een grootte van 16kWh in totaal ongeveer 720 megajoule aan energie vrij (Long, Blum, Bress, & Cotts, 2013, pp. 89-95). In het onderzoek van Lecocq (2012), waar twee verschillende elektrische auto's en hun identieke op diesel rijdende voertuigen met elkaar zijn vergeleken, is ook gemeten hoeveel energie er bij de verbranding is vrijgekomen; daarbij gaat het om de gehele auto en niet alleen het battery pack of de dieseltank. Voor het eerste automerk kwam er 6300 megajoule (29,8 MJ/kg) vrij bij verbranding van het elektrische voertuig en kwam er 6900 megajoule (35,9 MJ/kg) vrij bij verbranding van het voertuig op diesel. Bij het tweede automerk kwam er bij het elektrische voertuig 8500 megajoule (30,7 MJ/kg) vrij en bij het voertuig op diesel 10.000 megajoule (36,4 MJ/kg) (Lecocq, Bertana, Truchot, & Marlair, 2014).



Figuur 6: Weergave van totaal vrijkomende warmte (energie) bij elektrisch voertuig en voertuig op diesel (bron: Lecocq, 2012)

Bij het vergelijken van de vrijkomende warmte lijken aan de hand van figuur 6 beide voertuigen (onderste lijn is het elektrisch voertuig, de bovenste het dieselveertuig) eenzelfde brandontwikkeling te kennen in de eerste 20 a 30 minuten. Omdat bij de experimenten de voertuigen bij het interieur zijn aangestoken lijkt deze overeenkomst in brandverloop te komen doordat in de eerste paar minuten alleen het interieur heeft gebrand. Zowel de dieseltank als het battery pack zullen dus pas later in het brandverloop een rol hebben gespeeld. Daarbij lijkt de brandontwikkeling in de dieselveertuigen sneller te verlopen dan bij de elektrische voertuigen.

Colella et al. (2016) hebben in hun onderzoek het netto getal aan vrijkomende energie bepaald voor een 50% opgeladen Li-ion batterij. Daarbij kwamen zij op een waarde van 28,1 kilojoule per gram. Ook hierbij geldt dat hoe voller een batterij is opgeladen hoe meer energie er bij brand kan vrijkomen. Voor een volle batterij zijn er uit dit onderzoek helaas geen gegevens bekend (Colella, et al., 2016).

Betekenis voor busvervoer

Bij een battery pack van 250kWh leveren de waarden uit het onderzoek van Larsson et al. (2014) een potentieel aan vrijkomende energie op tussen 7.000 megajoule en 18.750 megajoule. Wanneer het onderzoek van Long et al. (2013) wordt omgerekend naar een

battery pack van 250kWh levert dit een potentieel aan vrijkomend energievermogen van 11.250 megajoule op. Hierbij gaat het alleen om de battery pack.

Bij een daadwerkelijke brand in een bus spelen ook zaken als interieur van de bus en constructiematerialen een rol bij het totaal aan potentieel vrijkomend energievermogen.

Het lijkt er op dat er bij elektrische voertuigen, ceteris paribus, minder energie vrij kan komen dan bij een vergelijkbaar voertuig op brandstof (Lecocq et al., 2014). Bij een vergelijking met diesel kunnen waarden het best terug worden gebracht naar dezelfde eenheden. Colella et al. (2016) presenteerden voor een 50% opgeladen batterij een waarde van 28,1 kilojoule per gram⁸. De waarde van diesel is 43,4 kiljoule per gram (The Engineering Toolbox, 2016). Per gram kan er dus bij de verbranding van diesel meer energie en daarmee hitte vrijkomen dan bij de verbranding van een Li-ion batterij (50% opgeladen).

4.2.4 Straling en temperatuur

In het onderzoek van Long et al. (2013) is bij de full-scale testen gekeken naar de straling die voortkwam uit het brandende battery pack. Hierbij werden op een afstand van ongeveer 1,5 meter voor het 16kWh Li-ion battery pack waarden gemeten van 2,1 en 2,2 kW/m². Op een iets grotere afstand werd een maximum gemeten van 2,7 kW/m². Bij een derde test, waarin ook het interieur van de auto mee brandde, werd op 1,5 meter een stralingswaarde gemeten van 8,1 kW/m². In hetzelfde onderzoek werd ook een battery pack met een vermogen van 4kWh voor een hybride voertuig aan dezelfde tests onderworpen. Deze genereerde een straling van 3,5 en 3,7 kW/m² op een afstand van ca. 1,50 meter. Met een aankleding van het interieur werd er op 1,50 meter een stralingswaarde van 11,9 kW/m² gemeten (Long, Blum, Bress, & Cotts, 2013).

Bij brand in batterijcellen kunnen door de aanwezigheid van metalen hoge temperaturen worden bereikt. Het is bekend dat batterijcellen bij brand temperaturen kunnen bereiken van meer dan 600°C (Mikolajczak, Kahn, White, & Long, 2011) & (Brandweeracademie, 2015).

Betekenis voor busvervoer

Het is niet zonder meer mogelijk om de gevonden waarden te extrapoleren naar battery packs zoals toegepast bij bussen. De verwachting is dat wanneer een battery pack met hoger vermogen in brand staat, de straling ook hoger zal zijn. Toch blijkt een battery pack met kleiner vermogen (4,4kWh tegen 16kWh) bij de full-scale testen van Long et al. (2013) een grotere stralingswaarde op te leveren op 1,50 meter afstand dan het battery pack met een groter vermogen. Het voorzichtige vermoeden hierbij is dat niet zo zeer het vermogen van het battery pack stralingswaarde beïnvloedt, maar dat dit meer afhankelijk is van de grootte en verpakkingsmaterialen van het battery pack. Uit die resultaten van Long et al. (2013) blijkt wel dat de materialen van het interieur een grotere bijdrage hebben aan de gemeten straling dan de battery packs.

Er zijn in deze eerste literatuurverkenning geen onderzoeken gevonden waarbij de straling van een elektrisch voertuig en een identiek voertuig op brandstof (diesel) met elkaar zijn vergeleken. Daar zou nader (literatuur) onderzoek voor nodig zijn.

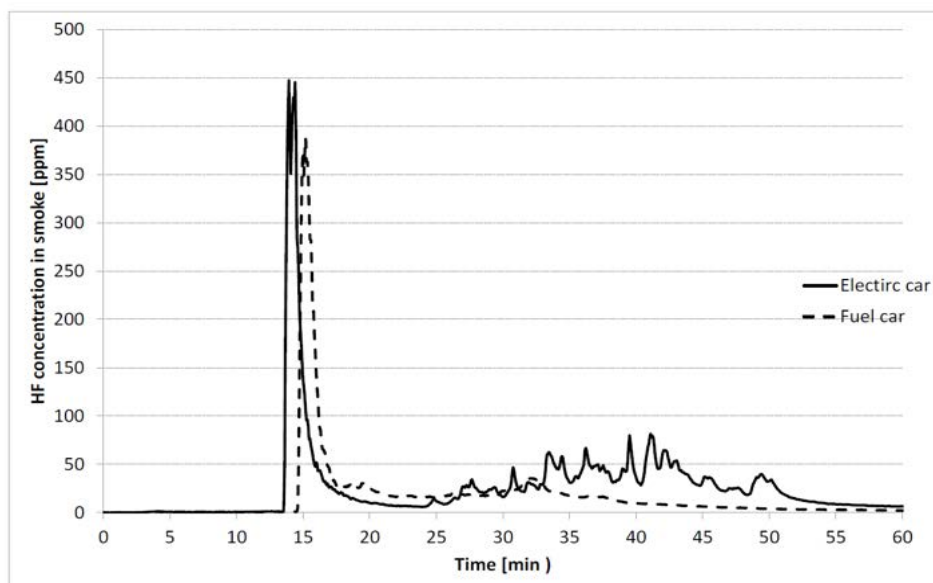
⁸ Het effect van een ander type Li-ion batterij, oplaadpercentage of grootte op dit cijfer zijn niet bekend. Daar zou nader onderzoek voor nodig zijn.

4.3 Vrijkomen van gevaarlijke stoffen

In tunnelveiligheid spelen temperatuur en brandvermogen (heat release rate) vaak een belangrijke rol in. Hoewel beide van invloed zijn op de constructieveiligheid, spelen beide volgens Truchot et al. (2016) een minder groter rol in overleefbaarheid. Daar gaat het volgens de auteurs voornamelijk om de giftigheid van gassen die vrijkomen bij brand (Truchot, Fouillen, & Collet, 2016). Bij het verbranden van battery packs komen gevaarlijke stoffen vrij. Daarbij gaat het om bijtende stoffen van het elektrolyt, verbranding van kunststoffen (onder meer van de verpakking) en kunnen verschillende giftige gassen vrijkomen als waterstoffluoride (HF) en chloorwaterstof (HCL) (Brandweeracademie, 2015).

In het artikel van Truchot et al. (2016) wordt onder meer gekeken naar de resultaten van een full-scale test waarin een brandende elektrische auto wordt vergeleken met drie auto's op traditionele brandstof. Daarbij wordt ingegaan op de veronderstelling dat door de specifieke samenstelling van batterijen, elektrische auto's waarschijnlijk meer giftige gassen produceren bij brand. In het onderzoek wordt een resultaat besproken waarbij een elektrische auto met Li-ion batterij is aangestoken. De belangrijkste conclusie is dat er bijna geen verschil zit in de productie van giftige gassen bij een brandende elektrische auto en auto's op koolwaterstoffen. Er blijkt wel meer waterstoffluoride (HF) geproduceerd te worden, ongeveer 1,8x zo veel. Toch wijkt de uitstootcurve van HF niet veel af van een normale auto (zie

figuur). Als verklaring hiervoor wordt gegeven dat de batterij zorgt voor het vrijkomen van meer HF, maar dit pas van invloed is op de tweede fase van de brand; de eerste fase vormt namelijk eenzelfde patroon als bij een normale auto en wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de aircovloeistof. Omdat de batterij pas na 30 minuten een rol gaat spelen, heeft het volgens Truchot et al. (2013) geen invloed op de giftigheid van rook tijdens de evacuatieperiode van mensen in een tunnel (Truchot, Fouillen, & Collet, 2016).



Figuur 7: Uitstoot van HF gedurende de brandperiode van de elektrische auto (bron: (Truchot, Fouillen, & Collet, 2016))

Truchot et al. (2016) hebben de resultaten bij de verbranding van een elektrische auto vergeleken met drie auto's die rijden op brandstof (zie **tabel 4** hieronder). Daarbij valt op dat er geen grote verschillen zitten tussen de verschillende voertuigen. Koolstofdioxide is het gas dat het meest vrijkomt. Het grootste verschil tussen het elektrische voertuig en de drie

conventionele voertuigen zit verhoudingsgewijs (zoals eerder aangegeven) in het vrijkomen van waterstoffluoride (circa twee keer zo hoog).

Tabel 4: Emissiegegevens verschillende stoffen bij verbranding auto's (als percentage van totaal). Bron: (Truchot, Fouillen, & Collet, 2016)

Auto en aandrijving	Auto 1 (brandstof)	Auto 2 (brandstof)	Auto 3 (brandstof)	Auto 4 (elektrisch)
Type voertuig	Stadsauto	Middenklasse gezinsauto	Topklasse gezinsauto	Middenklasse gezinsauto
Giftige gassen				
Waterstofchloride (HCL)	0.38%	0.29%	0.33%	0.30%
Waterstoffluoride (HF)	0.12%	0.11%	0.07%	0.23%
Blauwzuurgas (HCN)	0.03%	0.02%	0.05%	0.02%
Kool- en stikstofoxiden				
Koolstofdioxide (CO ₂)	96.54%	96.95%	97.33%	96.98%
Koolstofmonoxide (CO)	2.29%	2.11%	1.94%	1.83%
Stikstofoxide (NO)	0.13%	0.10%		0.12%
Stikstofdioxide (NO ₂)	0.06%	0.06%	0.15%	0.05%
Zwavedioxide (SO ₂)	-	-	0.13%	-
Onverbrande stoffen				
Koolwaterstoffen	0.45%	0.37%	-	0.45%

In een ander onderzoek, van Larsson et al. (2014) is ook gekeken naar de gevaarlijke stoffen die vrijkomen bij de verbranding van een Li-ion batterij. Daarbij hebben zij waarden gevonden die teruggerekend werden naar 15 tot 124mg HF (waterstoffluoride) per Wh. Daarbij kwam in hun resultaten naar voren dat hoe minder de batterij is opgeladen, hoe meer HF er uit een brandende batterij vrijkomt. In dit onderzoek wordt het gevaar van vrijkomende gassen, zoals HF, onderstreept. Daarbij is het belangrijk om te realiseren dat wanneer deze gassen in een omsloten ruimte, zoals een autocabine, terecht komen, de concentratie snel hoog genoeg kan zijn om gevaar te vormen (Larsson, Andersson, Blomqvist, Lorén, & Mellander, 2014).

In het artikel van Larsson et al. (2016) wordt aangegeven dat nog onvoldoende bekend is over de effecten van vrijkomende gevaarlijke gassen zoals HF, en dat meer onderzoek naar de uitstoot van gassen nodig is. Echter is het verstandig om vooraf een strategie (of manier) te bepalen over hoe om te gaan met deze gassen om zo te voorkomen dat deze terecht

komen in het passagiersgedeelte van een bus. Daarbij vormt in tunnels de uitstoot van deze gassen een risico omdat deze zich daar kunnen ophopen (Larsson, Anderson, Andersson, & Mellander, 2016).

Betekenis voor busvervoer

Bij bussen zal over het algemeen een groter battery pack worden toegepast dan in personenauto's. Daarbij komt er potentieel een groter volume aan gassen vrij (zie paragraaf 4.2.1), waardoor er per saldo ook in absolute aantallen meer schadelijke stoffen vrij zullen komen. Met het cijfer uit het onderzoek van Larsson et al. (2014) zal voor een battery pack met 250kWh tussen 3,75 en 31 kilogram aan waterstoffluoride vrij komen⁹. Hoe schadelijk dit zal zijn is onder meer afhankelijk van de ruimte waarin het gas vrijkomt. Komt het in de cabine van een bus vrij, dan zullen snel gezondheidsschadelijke concentraties worden bereikt. Ook bij het vrijkomen van gassen in een garage of tunnel kunnen deze zich ophopen en gevaar opleveren. Wanneer het in de buitenlucht vrijkomt, zal het gas zich mengen met de buitenlucht en treedt er minder snel een gevaar op met de vrijkomende gassen.

Vergeleken met conventionele voertuigen, en dus ook bussen op diesel, ligt het verschil vooral later in de brandperiode. In totaal zal er over de gehele brandperiode ongeveer 1,8 keer zo veel waterstoffluoride vrijkomen (Truchot, Fouillen, & Collet, 2016).

4.4 Incidentbestrijding

Bij incidenten zijn er een aantal specifieke gevaren en omstandigheden die ontstaan door de betrokkenheid van Li-ion battery packs. In deze paragraaf worden een aantal zaken besproken zoals deze teruggevonden zijn in bestudeerde literatuur.

4.4.1 Blussing

Zoals eerder aangegeven leveren Li-ion batterijen een uitdaging op bij het ontstaan van brand. Door Long et al. (2013) zijn verschillende full-scale experimenten met battery packs uitgevoerd. Daarbij is een auto nagebootst bestaande uit een stalen frame en platen. Bij vier experimenten waren battery packs vrij bereikbaar tijdens de blussing. Wel is het battery pack geïnstalleerd zoals het verkocht wordt; dus in een beschermde constructie. Bij twee experimenten was het voertuig bekleed en had het een interieur waardoor de battery packs minder goed bereikbaar waren. Binnen dit onderzoek concludeerden de onderzoekers het volgende voor wat betreft het blussen van een brand met een Li-ion batterij (Long, Blum, Bress, & Cotts, 2013):

- > De brandende Li-ion batterijen konden met water geblust worden.
- > De ontoegankelijkheid van de batterijen, die door de fabrikanten ter bescherming worden afgedekt in een soort omhulsel, bemoeilijkt de blussing significant. Zo kunnen hot spots die zich in het battery pack bevinden bijna niet bereikt worden.
- > Nadat de vlammen gedoofd zijn is het gevaar van thermal runaway (zie paragraaf 4.1) nog niet geweken. Om de battery packs voldoende te koelen is zeer veel water nodig gedurende een lange periode.
- > De benodigde hoeveelheid water om te blussen en koelen is onder meer afhankelijk van de grootte van de batterij, maar nog meer van haar locatie (bereikbaarheid) en

⁹ Deze waarden zijn puur indicatief. De daadwerkelijke effecten zijn o.a. afhankelijk van het type batterij welke toegepast is, de grootte van deze batterij en hoe vol deze is opgeladen. Ook hoeven verbanden niet altijd lineair te zijn: een twee keer zo grote batterijcapaciteit hoeft dus niet twee keer zo grote effecten op te leveren.

afscherming. Bij de afgeschermdde batterij (formaat voor auto) was in dit onderzoek tot bijna 10.000 liter nodig om deze voldoende te koelen¹⁰.

- > Voor de blussing van een battery pack in een voertuig moet gerekend worden op een blus- en koelperiode van één uur of langer. Hierbij moet rekening worden gehouden met de inzet van personeel en (extra) adembescherming. Er blijft gedurende lange tijd kans op herontsteking van het battery pack. Zo ontstond bij één van de experimenten 22 uur na blussing weer brand in het battery pack.
- > Voor een effectieve blussing lijkt het beter te zijn om het water voor langere tijd op één plek op te brengen alvorens de straal verplaatst wordt naar een ander gedeelte van de batterij. Nadat bij de batterij de vlammen er af zijn en deze in eerste instantie gekoeld is, lijkt het meer effectief om de straalpijp op de 'fog' stand te zetten om de buitenkant van de batterij verder af te koelen en uitgassen van elektrolyt te beperken.

Ook andere bronnen bevestigen de lastige blusbaarheid van brand in of met Li-ion batterijen. Zo geeft ook Middelkoop (2013) aan dat battery packs vaak moeilijk te blussen zijn vanwege hun slechte bereikbaarheid. Daarbij geeft zij het advies om te blussen vanaf een veilige afstand met veel water. Wanneer het batterijpakket niet bereikbaar is, zal men ervoor moeten kiezen om het voertuig gecontroleerd uit te laten branden en de omgeving af te schermen (Middelkoop, 2013). Deze tactiek wordt ook als optie door Long et al. (2013) voorgesteld. Daarbij moet wel rekening worden gehouden met de omgeving en kans van brandoverslag (Long, Blum, Bress, & Cotts, 2013).

In hoeverre een tunnel geschikt is om een brandende battery pack van een bus gecontroleerd in uit te laten branden en onder welke condities dit mogelijk is, is in dit onderzoek verder niet onderzocht.

Ook in het werkdocument van de Brandweeracademie (2015) wordt aangegeven dat de blussing en koeling van een battery pack gemiddeld meer tijd en water zal vergen dan branden van conventionele voertuigen. De afscherming van een battery pack bemoeilijkt de blussing bij brand. Wel zijn er sommige autofabrikanten die inmiddels een smeltplaat toepassen welke bij een autobrand zal doorbranden. Hierdoor is de battery pack beter bereikbaar voor het bluswater waardoor het water de batterij daadwerkelijk bereikt en effectiever wordt gekoeld, dan zonder een dergelijke voorziening. De brand in een battery pack blussen met alternatieve blusmiddelen zonder water zoals zand of poeder leidt zelden tot succes. Er is dan geen koeling en de reactie van lithium en elektrolyt wordt niet onderbroken, met als gevolg de kans op herontsteking (Brandweeracademie, 2015).

Betekenis voor bussen

Bij bussen worden grotere battery packs gebruikt. Het is aannemelijk dat er daarom meer water en tijd nodig is dan voor de blussing en koeling van een battery pack in een personenauto. Om te bepalen hoeveel water er nodig zal zijn om een battery pack van 250kWh te blussen is meer onderzoek nodig, al is het waarschijnlijk dat dit behoorlijk meer zal zijn dan 10.000 liter zoals is gemeten in het onderzoek van Long et al. (2013). Ter indicatie, wanneer die resultaten (bij een battery pack van 16kWh) lineair geëxtrapoleerd zouden worden naar een battery pack van 250kWh, levert dit een benodigde hoeveelheid water op van 156.000 liter (156m³)¹¹. Naast grootte van het battery pack speelt ook de bereikbaarheid van het battery pack voor water een grote rol. Het is niet de verwachting dat een battery pack in een bus makkelijker bereikbaar zal zijn dan in een auto.

¹⁰ De onderzoekers spreken hierbij de verwachting uit dat in de praktijk battery packs nog ontoegankelijker zullen zijn dan bij de experimenten en het daardoor waarschijnlijk moeilijker is om deze effectief te koelen.

¹¹ Deze waarden zijn puur indicatief. De daadwerkelijke effecten zijn o.a. afhankelijk van het type batterij welke toegepast is, de grootte van deze batterij en hoe 'vol' deze is opgeladen. Ook hoeven verbanden niet altijd lineair te zijn: een twee keer zo grote batterijcapaciteit hoeft dus niet twee keer zo grote effecten op te leveren. Om dit verband te bepalen zou nader onderzoek nodig zijn.

Voor de blussing van een bus op diesel of op een battery pack kan in beide instanties gebruik worden gemaakt van water. Bij diesel zal wel schuim opgebracht moeten worden om een effectievere blussing mogelijk te maken. Het grote verschil met een brandende bus met battery packs betreft de benodigde tijd en hoeveelheid water om een veilige situatie te bewerkstelligen. Bij brandende battery packs zal er langer gekoeld moeten worden met significant grotere hoeveelheden water om de kans op thermal runaway zo klein mogelijk te maken. Dit kan een periode van een uur of langer beslaan. Vervolgens blijft er nog een restrisico dat het battery pack alsnog na enkele uren tot ontbranding komt.

4.4.2 Elektrocutie

De in serie geschakelde batterijen bij een battery pack kunnen hoge voltages bereiken. Zo kunnen battery packs voor bussen voltages bereiken tot wel 600 volt (Brandweeracademie, 2015). Bij incidenten met dergelijke voertuigen is er het risico van elektrocutie bij contact met spanning voerende delen. De kans dat de carrosserie onder spanning komt te staan is klein. Het systeem van spanning voerende delen is goed geïsoleerd en moet volledig beschadigd raken om tot deze ongewenste situatie te komen; er moet direct contact tussen stroom voerende delen en de carrosserie ontstaan (Brandweeracademie, 2015). Bij incidenten zal voorkomen moeten worden dat de (beschadigde) batterij of het batterijcircuit direct wordt aangeraakt, geopend of beschadigd (Middelkoop, 2013).

Bij brandbestrijding lijkt het risico op elektrocutie klein te zijn. Bij het onderzoek van Long et al. (2013) werd gemeten welke spanning er op het chassis van het elektrische voertuig kwam te staan tijdens brand. Hier werd een beperkte en ongevaarlijke spanning gemeten (0,3 tot 0,4 Volt). Ook werd onderzocht hoe hoog de spanning op de straalpijp werd bij bestrijding van de brand in de batterij met water. De gemeten spanning op de straalpijp was hierbij verwaarloosbaar klein. Volgens de onderzoekers biedt het gebruik van standaard persoonlijke beschermingsmiddelen (kleding, schoeisel, ademlucht, etc.) voldoende bescherming wanneer op afstand wordt geblust en direct fysiek contact met de batterij of spanning voerende delen wordt voorkomen (Long, Blum, Bress, & Cotts, 2013).

Meer onderzoek is nodig om de gevaren te kunnen benoemen bij offensieve inzetacties waarbij aan het voertuig wordt geknipt, doorboort of op andere manieren wordt gemanipuleerd voor bijvoorbeeld technische hulpverlening of het verkrijgen van toegang tot het battery pack bij brand.

Betekenis voor busvervoer

Ook bij elektrische bussen zullen veel veiligheidssystemen aanwezig zijn waardoor de kans op elektrocutie klein lijkt te zijn. Wel blijft het gevaar op elektrocutie bestaan wanneer direct contact wordt gemaakt met spanning voerende delen of een (beschadigd) battery pack. Daarbij zal het hoge voltage dat bij bussen bereikt wordt (grote) schade aan het lichaam kunnen opleveren. Hoewel meer onderzoek nodig is om de gevaren op elektrocutie bij blussing van een groot battery pack in een bus in kaart te brengen, is de verwachting dat de spanning op carrosserie en straalpijp net als in het onderzoek van Long et al. (2013) beperkt zullen zijn.

In vergelijking met dieselbussen is het gevaar op elektrocutie bij elektrische bussen groter. Dieselbussen kennen natuurlijk ook elektrische systemen, maar deze zijn vaak geschakeld op een 24-volts accu. Deze accu zal nog steeds in elektrische bussen te vinden zijn, maar het voltage dat een battery pack aan een bus kan leveren ligt met 600 volt een stuk hoger en geeft daarmee een extra risico.

4.4.3 Overige gevaren

Naast het gevaar van brand (thermal runaway) en elektrocutie kunnen battery packs meer gevaren opleveren. In deze paragraaf worden enkele van deze bijkomende gevaren behandeld zoals deze in de literatuur zijn teruggevonden.

Lekkage

Bij lekkage van de batterijen kunnen er schadelijke en bijtende stoffen vrijkomen (Mikolajczak, Kahn, White, & Long, 2011). Bij lekkage van battery packs kan het elektrolyt vrijkomen wat een bijtende, alkalische of zure vloeistof kan zijn en brandbare oplosmiddelen kan bevatten. Het vrijkomen van elektrolyt zal niet snel gebeuren. Dit komt doordat het elektrolyt in gel-vorm is geabsorbeerd in de celplaten en niet zo maar uit het battery pack lekt, zelfs niet als de cel is gebarsten. Lekkage van elektrolyt is alleen mogelijk als er kracht wordt uitgeoefend op een beschadigde cel, bijvoorbeeld als bij een ernstige aanrijding met een zwaar voertuig het pakket 'geplet' wordt (Brandweeracademie, 2015).

Explosiegevaar

Daarnaast kunnen er, zoals eerder aangegeven, gassen worden gevormd in een batterij cel. Door deze gassen wordt er druk opgebouwd in de cellen. Wanneer deze druk te hoog wordt kan dit gas onder hoge druk vrijkomen. Daarbij is het gevaar dat er delen van de cel of verpakking met kracht worden weggeschoten en op deze manier verhitte materialen en vlammen verspreidt over grotere afstand (meerdere meters) rond het battery pack. In elektrische voertuigen kunnen verschillende type cellen worden toegepast zoals platte cellen, pouches en cilindrische cellen. Vooral deze cilindrische batterij cellen leveren een risico van rondvliegende delen op (Mikolajczak, Kahn, White, & Long, 2011, pp. 51-52). Bij de full-scale experimenten van Long et al. (2013) zijn geen rondvliegende projectielen, explosies of uitbarstingen waargenomen tijdens de tests. Wel waren er hevige vonken (violent sparking) te zien. In de experimenten ging het om vierkante, platte cellen en zijn er geen batterijen getest die samengesteld zijn uit de veronderstelde meer risicovolle cilindrische cellen (Long, Blum, Bress, & Cotts, 2013).

Verontreiniging bluswater

Een ander aspect waar rekening mee moet worden gehouden bij brandbestrijding van elektrische bussen is de mogelijke vervuiling van het bluswater. In het onderzoek van Long et al. (2013) is gekeken naar welke milieuverontreinigende stoffen er in het bluswater terug werden gevonden. Het bluswater was iets zuurder na blussing dan voor blussing. Daarnaast werden er in het verontreinigde bluswater verhoogde waarden teruggevonden voor de stoffen chloor en fluor. Bij chloor ging het om 2 tot 3 keer verhoogde waarden, en voor fluor waren de waarden meer dan 100 keer zo groot (Long, Blum, Bress, & Cotts, 2013). Het gevolg van deze verhoogde waarden op bijvoorbeeld schadelijkheid en waterzuivering is door Long et al. (2013) niet beschreven. Om deze gevolgen in kaart te brengen zal nader onderzoek nodig zijn.

4.5 Vergelijking elektrische bus met dieselbus

In dit hoofdstuk worden de gevaarsaspecten als gevolg van de battery pack van de elektrische bus verschillende aspecten kwalitatief vergeleken met een dieselbus (en eventueel elektrische voertuigen als over bus geen info is). Daarbij is er gekeken naar:

- > de scenario kans (op ongevalsscenario 'brand van de brandstof')
- > brandontwikkeling

- > toxiciteit van gassen bij brand
- > spanning op voertuig bij brand
- > carcinogeniteit van gassen bij brand
- > bestrijdbaarheid: bereikbaarheid, bluswaterhoeveelheid en afvalwater.

Scenariokans

De kans op brand in het battery pack door het falen van een cel is erg klein. Elke cel heeft kans op falen, maar deskundigen stellen deze in de range van 1-op-1 miljoen tot sommigen zelfs op 1-op-100 miljoen. Daarbij moet worden opgemerkt dat hoe meer cellen er in een battery pack gebruikt worden, hoe groter de kans wordt dat er daarbij eentje zal falen. Een groter gevaar vormen externe factoren zoals beschadiging of doorboring. Door o.a. deze factoren en opwarming kunnen batterijen in thermal-runaway geraken. Afhankelijk van het type batterij kan dit door opwarming bij temperaturen vanaf 150°C tot 270°C plaatsvinden. Het meest veilig lijken Lithium-ion-Titanate batterijen en Li-ion-ijzer-fosfaat batterijen. De kans op brand in een dieselbus is ook relatief beperkt. Diesel is wel een brandbare vloeistof en wanneer deze uit de tank vrijkomt, zal deze brandbare dampen af kunnen geven. Dit gebeurt bij een temperatuur > 55°C. Deze brandbare dampen kunnen ontstoken worden door een ontstekingsbron met een temperatuur van 225 - 230°C (Shell Trading Rotterdam B.V., 2012), en zullen tot een snelle brandontwikkeling leiden.

Brandontwikkeling

In de verschillende bestudeerde onderzoeken zijn verschillende brandgegevens gevonden met betrekking tot Li-ion batterijen. Wanneer het gaat om de maximale Heat Release Rate lijken elektrische batterijen minder vermogen te veroorzaken dan koolwaterstoffen zoals diesel. Ook geven verschillende onderzoeken aan dat er bij Li-ion batterijen in totaal minder warmte (energie) vrij komt per eenheid dan bij diesel het geval is. Koolwaterstoffen, zoals diesel, kennen een brandcurve waarin de temperatuur in de eerste paar minuten zeer snel stijgt en de brand zich dus snel ontwikkelt. Bij battery packs ligt deze ontwikkelingsnelheid waarschijnlijk lager. Dat blijkt ook uit de geschetste curve met waterstoffluoride (figuur 7); pas na ongeveer 25 minuten wordt er waterstoffluoride gemeten welke vermoedelijk afkomstig is uit het battery pack. De batterijcellen hebben een aanlooptijd nodig om op te warmen, uit te gassen en vervolgens aan de verbranding deel te nemen. Als gevolg hiervan zal de brand zich in vergelijking met koolwaterstoffen in de eerste paar minuten meer gelijkmatig ontwikkelen en pas het bij optreden van thermal runaway een exponentieel verloop kennen.

Toxiciteit

Bij een brand komen er bij zowel een bus op diesel als bij een bus op battery packs giftige stoffen vrij. Bij een brand in een elektrische bus zal meer van het giftige gas waterstoffluoride vrijkomen. Daarom is de toxiciteit bij elektrische bussen waarschijnlijk groter dan bij bussen op diesel. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat toxiciteit voor een groot gedeelte bepaald wordt door de verwerking van kunststoffen en interieurs in een voertuig.

Over de gevolgen van de verhoogde concentratie waterstoffluoride uit het battery pack in relatie tot andere giftige stoffen die vrijkomen en de exacte verhouding tussen elektrische voertuigen en conventionele voertuigen bestaat nog wel onduidelijkheid in de literatuur.

Elektriciteit

De gevaren van elektriciteit zijn bij een elektrische bus groter dan bij een bus op diesel. Hiertoe zitten er in elektrische voertuigen diverse veiligheidssystemen. Wanneer deze veiligheidssystemen ook bij bussen zijn ingebouwd, worden deze gevaren beperkt. Er bestaan verschillende extra veiligheidssystemen (zoals noodknoppen en noodschakelaars) om de veiligheid verder te vergroten bij incidenten. Ook dieselbussen

kennen elektrische gevaren als gevolg van het 24-volts circuit, al zijn deze kleiner dan bij elektrische bussen. Een verhoogd gevaar leveren elektrische bussen wanneer met (hydraulisch) gereedschap toegang tot het voertuig moet worden verschaft. Daarbij moet worden voorkomen dat men in direct contact komt met spanningvoerende delen zoals kabels of een losliggende batterij.

Carcinogeniteit

Op dit moment is er onvoldoende informatie beschikbaar over het verschil in carcinogeniteit tussen diesel en Li-ion batterijen. In de bestudeerde literatuur is informatie gevonden over schadelijke stoffen zoals waterstoffluoride, maar in hoeverre deze op de korte en lange termijn een verhoogd risico op kanker opleveren is nog niet terug gevonden. Daar zou nader onderzoek voor nodig zijn om te bepalen of hier al gegevens over bekend zijn.

Bestrijdbaarheid

Uit de literatuur is gebleken dat branden met Li-ion batterijen moeilijk te bestrijden zijn. Wanneer de battery pack in brand staat is voor een effectieve blussing en koeling zeer veel water nodig; zeker bij een battery pack ter grootte van een bus. Daarbij zorgt de vaak moeilijke bereikbaarheid van deze pakketten voor een lange inzetduur. Zelfs na geruime tijd koelen blijft er voor langere tijd kans op herontsteking in een batterij cel. Een brand in een dieselbus is relatief eenvoudig te blussen met water en schuim. Inzettechnieken en inzetacties zijn door de brandweer op dat gebied al beproefd en gemeengoed. Voor incidenten met Li-ion batterijen geldt dit nog niet.

Samenvattend

Als we de dieselbus als uitgangssituatie nemen, dan geeft de onderstaande tabel het verschil aan van de elektrische bus ten opzichte van de dieselbus op de hierboven beschreven vergelijkingsaspecten.

Tabel 5: Elektrische bus dieselbus

Vergelijkingsaspect	Elektrische bus dan dieselbus
Scenariokans brand brandstof	Kleiner
Brandontwikkeling	Langzamer en geringer
Toxiciteit	Groter
Elektriciteit	Groter
Carcinogeniteit	Geen verschil/weinig gegevens gevonden
Bestrijdbaarheid	Moeilijker

Onze conclusie op basis van deze tabel luidt dat elektrische bussen niet onveiliger lijken (vanwege enkele thans nog bestaande onzekerheden) dan dieselbussen.

5 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. Hiertoe hebben we condities opgesteld om op te nemen in de aanbesteding, en waarmee het aspect brandveiligheid van elektrische bussen verder gegarandeerd kan worden. Daarbij is er verschil gemaakt tussen een hoofdconditie voor het veilig gebruik van elektrische bussen en verschillende subcondities.

5.1 Hoofdconditie

Zorg er voor dat er geen thermal runaway op kan treden, dan wel dat de kans hierop zo laag mogelijk is (zie hiertoe de subcondities hieronder).

Het grootste gevaar van elektrische bussen is het optreden van thermal runaway. De hoofdconditie om elektrische bussen veilig in te zetten is dan ook het voorkomen van een thermal runaway. Ondanks dat in de bestudeerde literatuur wordt aangegeven dat elk typ Li-ion batterij zijn eigen 'safety window' heeft (een range van condities die, wanneer de battery pack daarbuiten treedt, zichzelf gaat opwarmen en een thermal runaway veroorzaken), wordt er in één bron ook genoemd dat een producent aangeeft dat zijn batterij geen kans heeft op thermal runaway. Als het daadwerkelijk mogelijk is het optreden van thermal runaway door zowel interne als externe factoren weg te nemen, zou dit de brandveiligheid van elektrische bussen aanzienlijk verbeteren. Mocht dat onmogelijk blijken, dan kunnen onderstaande subcondities aan de elektrische bus de veiligheid verder garanderen.

5.2 Subcondities

Er zijn verschillende veiligheidssystemen beschikbaar die de veiligheid van Li-ion batterijen kunnen vergroten. Hierbij is onderscheid gemaakt in subcondities die betrekking hebben op het voorkomen van brand in een battery pack, het beperken van de gevolgen bij brand in een battery pack en op subcondities die een effectieve incidentbestrijding faciliteren.

Voorkomen van brand in een battery pack

De condities zijn deels gebaseerd op het artikel van Larsson et al. (2016) waarin diverse maatregelen en systemen worden benoemd om de kans op het ontstaan van brand in elektrische bussen zo klein mogelijk te houden.

1. Zorg voor deugdelijke compartimentering van de battery pack zelf en van de battery pack ruimte in de bus.

Aan de ene kant wordt door interne compartimentering in de accu zelf de gevolgen van een thermal runaway beperkt / vertraagd. Daarnaast kan compartimentering van de gehele batterij de overige delen van de bus beter beschermen bij brand, bijv. het passagiersgedeelte. Andersom geldt dit natuurlijk ook voor bescherming van de accu bij brand in het passagiersgedeelte.

2. **Zorg voor voldoende afstand tussen de battery pack en andere brandgevoelige onderdelen van de bus**
Installeer het batterijpakket op afstand van en/of zorg voor een goede afscherming van locaties/onderdelen van de bus waar relatief vaak brand ontstaat zoals wielkasten, elektromotoren en brandgevaarlijke vloeistoffen (zie ook conditie 9 hieronder).
3. **Zorg voor een deugdelijk voorziening (bijv. 'Battery Management Systeem' (BMS)) die het voltage, spanning en temperatuur van de battery pack continu monitort**
Een BMS monitort het batterijpakket en heeft controle over het voltage van individuele cellen, de totale spanning (stroom) in het pakket, temperatuur en kan een batterij isoleren in geval van nood.
4. **Zorg voor een deugdelijk verpakking, afscherming en montage van de battery pack (bijv. een 'Mechanical Crash Structure' (MCS))**
Een deugdelijke MCS heeft betrekking op de verpakking, afscherming en montage in het voertuig die het batterijpakket beschermen tegen een mechanische impact van buitenaf.
5. **Zorg voor een voorziening waardoor het battery pack automatisch wordt uitgeschakeld bij een incident (bijv. 'High Voltage Connectors/Disconnectors')**
Deze worden gebruikt om een batterijpakket uit te schakelen bij normaal gebruik en kunnen ook bij een crash het batterijpakket uitschakelen om het elektrocutiegevaar te verkleinen. Let wel dat de bus nog wel manoeuvreerbaar moet zijn (bijv. voor het wegslepen ervan).
6. **Zorg voor een deugdelijke bescherming tegen kortsluiten (bijv. een 'Short Circuit Protection')**
Hierbij gaat het om het toepassen van zekeringen en materialen die beschermen tegen kortsluiting en kortsluitingsbronnen van buitenaf die mogelijk kunnen leiden tot kortsluiting in het batterijpakket zelf.
7. **Zorg voor een deugdelijke voorziening om de temperatuur in een battery pack te monitoren (bijv. een Thermal Management System (TMS))**
Het TMS is specifiek ontworpen om de temperatuur in een battery pack te controleren en werkt nauw samen met het BMS. Bij een stijging in temperatuur kan het TMS systeem bijvoorbeeld een koelsysteem in werking stellen of (delen van) het pakket uit laten schakelen. De bedoelde informatie zou op twee plekken (redundantie) gepresenteerd moeten worden: op het dashboard van de buschauffeur en in de centrale operating room van de busonderneming/concessiehouder.

Beperken van de gevolgen van brand in elektrische bus

Wanneer het toch mis gaat moet er rekening worden gehouden met het beperken van de gevolgen van brand en de veiligheid van inzittenden. Vooraf kunnen maatregelen worden getroffen om gevolgen beperkt te houden. Daarbij denken wij aan de volgende subcondities:

8. **Zorg voor een installatie die de chauffeur en passagiers direct waarschuwt bij een 'thermal runaway'**
Zorg voor snelle detectie van brand/ thermal runaway / opwarming in de cellen en zorg dat de chauffeur en passagiers direct gewaarschuwd worden (direct en via de centrale van de busonderneming) om tijdige ontruiming mogelijk te maken. Deze conditie hangt nauw samen met de conditie over het installeren van een thermal management systeem (conditie 7).

9. Zorg voor een brandwerende scheiding *tussen* batterijpakket en passagierscompartiment

Op deze manier wordt de kans verkleind dat de brand zich uitbreidt naar het passagiersgedeelte waarmee de veiligheid voor passagiers wordt verbeterd en branduitbreiding in beide richtingen beperkt kan worden. Waar het in conditie 2 hierboven gaat om het creëren van voldoende onderlinge afstand tussen de battery pack en brandgevoelige onderdelen van de bus, gaat het in deze conditie om het gebruik van brandwerende materialen tussen battery pack en het passagiersgedeelte.

10. Zorg voor een deugdelijke bescherming van het passagierscompartiment tegen toxische gassen

Voorkom dat vrijkomende toxische gassen uit Li-ion batterijen in het passagierscompartiment terecht kunnen komen, daarbij opgemerkt dat het vrijkomen van schadelijke gassen in een tunnelbuis ook buiten het voertuig gevaar op kan leveren.

11. Zorg voor brandwerende scheidingen *in* de battery pack

Installeer brandwerende scheidingen in het batterijpakket, bijvoorbeeld tussen de batterijmodules, om verspreiding van brand in het batterijpakket te kunnen stoppen.

Incidentbestrijding

Om de kans op een succesvolle incidentbestrijding te vergroten denken wij aan de volgende subcondities:

12. Zorg ervoor dat hulpverleningsdiensten veilig bij en aan het voertuig kunnen werken door het voertuig bij een noodsituatie spanningsloos te maken

Bij incidenten moeten hulpverleners bij en aan het voertuig kunnen werken zonder het gevaar op elektrocutie. Het is aanbevolen om een fysieke mogelijkheid tot het spanningsloos maken van het voertuig te creëren. De onderzoekers denken hierbij aan een noodknop die door hulpverleners ingedrukt kan worden bij een noodgeval en scheiding maakt tussen het battery pack en de hoog voltage installatie.

13. Zorg ervoor dat het battery pack goed te bereiken is voor het blusmiddel van de brandweer

Daarbij is het belangrijk dat het blusmiddel direct op of in de batterij gebracht kan worden. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan een aansluitsysteem voor materiaal van de brandweer waardoor het de batterij direct kan koelen (ca 100 a 200 liter per minuut). Ook is het van belang dat het koelwater goed afgevoerd kan worden.

14. Zorg voor een voorziening aan de bus waardoor deze bij incidenten uit de tunnel gesleept kan worden (bijv. een of meerdere trekogen).

Bij onvoldoende blus- en koelwater kan het een effectieve inzettechniek zijn om het battery pack uit te laten branden, maar dan wel op een veilige plek. Dat is veelal niet in de tunnel maar er buiten. De bus zal dan uit de tunnel gesleept moeten worden mits dit veilig kan, hetgeen vraagt om snelle sleepacties (de brand moet nog niet in alle hevigheid zijn losgebarsten). De sleeprichting zal mede afhangen van eventuele obstakels in de tunnel en de ondersteuning door het tunnelventilatiesysteem. Het is van belang dat de bus beschikt over een zogenaamde vrijloop zodat deze gesleept kan worden zonder dat dit op een weerstand stuit.

Daarnaast zal een gedegen instructie aan de buschauffeurs over hoe te handelen bij bepaalde verkeerssituaties, gevaren en signalen vanuit de monitoringsystemen in de bus een bijdrage kunnen leveren aan de veiligheid van elektrische bussen in de tunnels.

Voorgesteld wordt om ook deze opmerking, voor zover mogelijk (omdat het geen technische/ontwerp maatregel aan de bus betreft), in de aanbesteding als conditie op te nemen.

Een conditie die daarnaast wel degelijk bijdraagt aan de veiligheid en waar de busfabrikant en concessiehouder een rol in spelen maar ook niet een ontwerpmaatregel aan de bus betreft, is dat beide (minimaal een keer per jaar en indien de actualiteit daar aanleiding toegeeft, direct) met concessieverlener, tunnelbeheerder en de Veiligheidsregio in overleg gaan over de meest actuele ontwikkelingen op het gebied van:

- a) technische ontwikkelingen omtrent battery packs,
- b) Internationaal en nationaal beleid rondom elektrisch vervoer en de veiligheid ervan,
- c) leren van incidenten (op de eigen lijnen en in groter perspectief)

Hierboven zijn condities geformuleerd en geadviseerd ten behoeve van de aanbesteding voor de aanschaf van elektrische bussen. Het betreft dus condities/maatregelen aan de bussen zelf in relatie tot de battery pack. Aan de battery pack worden al tal van eisen gesteld vanuit (inter-)nationale normen en richtlijnen.

Zoals in de inleiding van dit rapport geschetst, bestaat tunnelveiligheid uit het samenhangende geheel van tunnelontwerp, gebruik van de tunnel (waaronder dus de voertuigen) en organisatie. Ook het tunnelontwerp, de tunneltechnische installaties en de organisatie (veiligheidsbeheersysteem en incidentbestrijding) zal een grote bijdrage kunnen leveren aan de veiligheid in de tunnel. Uiteindelijk zal het geheel (van elektrische bussen in de tunnel en de incidentbestrijding) moeten worden beschouwd om de tunnelveiligheid te beoordelen.

De beoordeling in Nederland van de veiligheid van een wegtunnel vindt onder meer plaats door een kwantitatieve risico analyse (QRA) om aan te tonen dat de tunnel aan de wet- en regelgeving voldoet. Het hiertoe beschikbare RWS QRA model is voor 'standaard' Rijkswegtunnels. Van een standaard Rijkswegtunnels is in het Buitenvelderttunnelsysteem geen sprake: de tunnels liggen niet in hoofdwegennet, kennen een specifieke doelgroepenstrook voor bussen en specifiek gebruik (hoog aandeel van elektrische bussen in het gebruik). Een dergelijke QRA is derhalve geen sinecure vanwege de hierboven geduide verschillen van elektrische bussen ten opzichte van conventionele bussen.

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 voor het onderdeel van het voertuig (lees de battery pack in de elektrische bus) dat de veiligheid in tunnels voor dit aspect voldoende is gegarandeerd. Natuurlijk zullen ook aan het tunnelontwerp en het gebruik van de tunnel eisen gesteld kunnen worden ten behoeve van de veiligheid. Die eisen zullen afgestemd moeten worden met de gevaren van het gebruik, zoals het rijden met elektrische bussen. Tevens zullen opleiding, training en oefening van de buschauffeur en hulpdiensten bijdragen aan de veiligheid van elektrische bussen in tunnels.

Tot slot zal extra kennis van specifiek de gevaren van elektrische bussen in tunnels en de bestrijding ervan bij kunnen dragen aan de tunnelveiligheid. We hebben op diverse plekken in deze rapportage aangegeven welke delen van informatie er op dit moment ontbreken over met name fysische aspecten van brandende battery packs van bussen. Een meer uitgebreidere literatuurstudie (bijv. t.b.v. de kansinschatting van branden van battery packs/thermal runaway) met eventueel daaropvolgend een experimenteel onderzoeksprogramma zou een goede stap zijn om de ontbrekende informatie (en mogelijk meer) op te leveren (bijv. over snelheid van brand- en rookontwikkeling of bestrijdingstactieken bij branden van elektrische bussen).

6 Conclusie

In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de hoofdvraag welke belangrijke extra of andere risico's de elektrische bussen hebben ten opzichte van dieselbussen, en welke invloed elektrische bussen hebben op de veiligheid in tunnels.

Over de extra dan wel andere risico's blijkt uit deze eerste verkenning dat elektrische bussen op het aspect aandrijving niet onveiliger lijken te zijn dan dieselbussen. Dieselbussen hebben een grote hoeveelheid aan de brandgevaarlijke stof diesel bij zich welke bij incidenten vrij kan komen en brand kan veroorzaken. Bij elektrische bussen wordt het vervoer van enkele honderden liters brandgevaarlijke stof weggenomen doordat de battery pack de energie voor de aandrijving levert. Het is waarschijnlijk dat bij een brand in een elektrisch voertuig minder energie vrij komt dan bij een identiek voertuig dat beschikt over een (volle) dieseltank. Over de verhouding tussen elektrische en dieselbussen voor wat betreft de Heat Release Rate, straling en temperatuur is op dit moment nog onvoldoende bekend om hier een duidelijke afweging te maken tussen welke meer brandveilig is.

Het bijzondere aan elektrische bussen is het grote battery pack wat voor de energie van de elektrische aandrijving zorgt. Verder zijn deze bussen qua gevaren vergelijkbaar met "normale" bussen die in het streekvervoer worden gebruikt. Het belangrijkste gevaar van een batterijpakket is de kans op thermal runaway waarbij er een kettingreactie in het pakket op gang gebracht kan worden die de brandontwikkeling versnelt. De interne faalkans op thermal runaway is echter klein en met verschillende maatregelen kunnen de risico's en effecten verder beperkt worden. Elektrische bussen leveren daarnaast nog enkele specifieke gevaren op. Zo komen er bij verhitting van battery packs schadelijke en giftige stoffen vrij. Daarbij zal er vooral meer waterstoffluoride, een giftige stof, vrij komen bij brand. Volgens de huidige informatie is de extra hoeveelheid ten opzichte van huidige voertuigen beperkt en ook verhoudingsgewijs ten opzichte van andere vrijkomende schadelijke stoffen lijkt de bijdrage van waterstoffluoride beperkt. Naar de precieze effecten zal echter meer onderzoek nodig zijn. Ook het gevaar op elektrocutie lijkt beperkt te zijn. Direct contact met spanning voerende delen zal wel voorkomen moeten worden en beproefde systemen om de bus bij een incident spanningsloos te maken kunnen vooraf geïnstalleerd worden.

Het bestrijden van brand in de battery pack van elektrische bussen is moeilijker dan brand van de dieselveorraad bij dieselbussen. De slechte bereikbaarheid van het battery pack en benodigde tijdsduur om batterijcellen voldoende terug te koelen vergen een grote hoeveelheid bluswater en langere inzetduur. Tunnels zullen de bestrijding van gevolgen van branden met elektrisch bussen verder bemoeilijken. Echter, zoals hierboven reeds aangeduid zal bij een brand van de battery pack naar waarschijnlijkheid minder energie vrijkomen en een stuk trager ontwikkelen dan een koolwaterstof brand (brand van de dieselinhoud van de dieselbus), wat ruimere mogelijkheden biedt voor de brandbestrijding.

Referenties

- 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).
- Battery University. (2016, 07 05). *BU-205: Types of Lithium-ion*. (Cadex Electronics Inc.) Retrieved 07 22, 2016, from Learn about batteries:
http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- Battery University. (2016, 05 13). *Safety Concerns with Li-ion*. (Cadex Electronics Inc.) Retrieved juli 28, 2016, from http://batteryuniversity.com/learn/article/safety_concerns_with_li_ion
- Battery University. (2014, 03 19). *Safety of Lithium-ion Batteries*. (Cadex Electronics Inc.) Retrieved 07 28, 2016, from
http://batteryuniversity.com/learn/article/safety_of_lithium_ion_batteries
- Brandweeracademie. (2015). *Brandweeroptreden bij incidenten met batterijen, accu's en brandstofcellen (concept)*. Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid.
- 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.
- DEKRA. (2012, 10 29). *Lithium-Ionen-Batterien stellen in Brandversuchen Sicherheit unter Beweis*. (W. Sigloch, Ed.) Retrieved from Aktuelle DEKRA Versuchsreihe zur Sicherheit von Elektrofahrzeugen:
http://www.dekra.com/de/pressemitteilung?p_p_lifecycle=0&p_p_id=ArticleDisplay_WAR_ArticleDisplay&_ArticleDisplay_WAR_ArticleDisplay_articleID=24844066
- Larsson, F., Anderson, J., Andersson, P., & Mellander, B. (2016). Safer battery systems in electric vehicles – an electrified bus perspective. *Eurotransport, 2016*(Volume 14, issue 3), 50 - 53.
- 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. e. (2012). *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.
- 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.
- Massachusetts Institute of Technology. (2013, november 26). *Are Electric Vehicles a Fire Hazard?* Retrieved 07 28, 2016, from MIT Technology Review:
<https://www.technologyreview.com/s/521976/are-electric-vehicles-a-fire-hazard/>
- Middelkoop, J. (2013, juni 27). Workshop hybride en elektrische aandrijving. *Presentatie Netwerkdag OGS*.
- Mikolajczak, C., Kahn, M., White, K., & Long, R. (2011). *Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment*. Quincy, MA (USA): Fire Protection Research Foundation.
- Shell Trading Rotterdam B.V. (2012). *Veiligheidsinformatieblad - Diesel*. Rotterdam: Shell Trading Rotterdam B.V. Retrieved juli 28, 2016, from <http://www.shell.com/business-customers/trading-and-supply/trading/trading-material-safety-data-sheets/>
- The Engineering Toolbox. (2016, juni 23). *Fuels - Higher Calorific Values*. Retrieved juli 28, 2016, from http://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html

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.

Watanabe, N. e. (2012). *Comparison of fire behaviors of an electric-battery-powered vehicle and gasoline-powered vehicle in a real-scale fire test*. Japan: National Research Institute of Police Science.