



Inventarisatie veiligheidsaspecten ZE-bussen



CE Delft

Committed to the Environment

Inventarisatie veiligheidsaspecten ZE-bussen

Dit rapport is geschreven door: Denise Hilster, Eric Tol, Julius Király

Delft, CE Delft, december 2021

Opdrachtgever: CROW

Kenmerk: N1931F-0605-ON-GHER

Publicatienummer: 21.210399.172

Personenvervoer / Bussen / Elektrisch / Waterstof / Veiligheid

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider [Eric Tol](#) (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, ngo's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al meer dan 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Begrippenlijst	4
	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
	1.1 Aanleiding voor het onderzoek	7
	1.2 Doel van het onderzoek	8
	1.3 Leeswijzer	9
2	Onderzoeksaanpak	10
	2.1 Afbakening	10
	2.2 Onderzoeksmethode	12
	2.3 Literatuuronderzoek en gebruikte bronnen	13
3	Onderzoeksresultaten	16
	3.1 Inleiding BEV- en FCEV-bussen en waterstof	16
	3.2 Voertuigveiligheid	18
	3.3 Accupakketten en waterstoftanks	24
	3.4 Afwezigheid van geluid	28
	3.5 Brandveiligheid	30
	3.6 Veiligheid in besloten ruimtes	34
	3.7 Incidentmanagement	38
	3.8 Onderhoud en veiligheid	43
	3.9 Te water geraking	46
	3.10 Laad- en tankinfrastructuur	47
4	Kennishiaten	55
	4.1 Kennishiaat 1: Gebrek aan empirische data over de impact ZE-technieken op de omvang van een incident in geval van een botsing	56
	4.2 Kennishiaat 2: De veiligheidseisen die gesteld worden ten aanzien van het ontwerp, de functionering en het testen van ZE-bussen	57
	4.3 Kennishiaat 3: Het uitwisselen van kennis en ervaring na incidenten met ZE-bussen	58
	4.4 Kennishiaat 4: Delen informatie toedracht van incidenten met ZE-bussen	59
	4.5 Kennishiaat 5: De interactie met de omgeving bij brand met een ZE-bus op een ov-knooppunt	60
	4.6 Kennishiaat 6: Het bergen van ZE-bussen na een brand	61
	4.7 Kennishiaat 7: Ontwerprichtlijnen voor het stallen van ZE-bussen in stallingen en busremises	62
5	Conclusie	64
	5.1 Hoofdconclusie	64
	5.2 Beantwoording onderzoeksvragen	65



	Bibliografie	67
A	Overzicht partijen in begeleidingsgroep	79
B	Studie veiligheid en elektrische personenauto's (2020)	80
C	Overzicht geïnterviewde partijen	81
D	Overzicht interviewvragen	82
E	Overzicht incidenten	86



Begrippenlijst

Begrip	Terminologie
AVAS	Acoustic Vehicle Alerting System
BEV	Batterijelektrisch voertuig
BMS	Batterij management systeem
CNG	Compressed natural gas (aardgas)
EV	(Algemeen) elektrisch voertuig
FCEV	Fuel cell (brandstofcel) elektrisch voertuig
HEV	Hybride elektrisch voertuig
LNG	Liquified petroleumgas (vloeibaar aardgas)
OV	Openbaar vervoer
PHEV	Plug-in hybride elektrisch voertuig
TPRD	Thermally activated Pressure Release Device
VR	Veiligheidsregio
ZE	Zero-emissie

Samenvatting

Het Bestuursakkoord Zero Emissie Bussen (BAZEB) beoogt dat per 2025 alle nieuwe openbaarvervoerbussen in Nederland zero-emissie (ZE) zijn en dat ov-bedrijven per 2030 uitsluitend gebruik maken van ZE-bussen. ZE-bussen kunnen batterijelektrisch (BEV-bussen) of brandstofcel-elektrisch (FCEV-bussen) zijn. Deze bussen zijn nog relatief nieuw en er is minder ervaring mee dan met fossiel-aangedreven bussen.

Bij de transitie naar ZE-busvervoer is het een voorwaarde dat de veiligheid geborgd is. Een totaaloverzicht van de veiligheidsaspecten waar rekening mee gehouden dient te worden bij de inzet van ZE-bussen ontbreekt echter nog, evenals een bundeling van de beschikbare kennis.

CROW heeft (als onderdeel van de kennisagenda van het BAZEB) aan CE Delft gevraagd om de beschikbare kennis over veiligheidsaspecten te inventariseren en daarvan een overzicht op te stellen. Dit voorziet in de informatiebehoefte van onder meer wegbeheerders, ov-autoriteiten, ov-vervoerders en de Rijksoverheid. Verder heeft CROW aan CE Delft gevraagd om in kaart te brengen welke kennis nog nodig is om een compleet beeld van de veiligheidsaspecten te vormen. Daar waar kennis ontbreekt, zijn kennishiaten geformuleerd, inclusief de aanpak voor het verder invullen van deze kennishiaten.

ZE-bussen moeten, net als fossiel-aangedreven bussen, aan strenge veiligheidseisen voldoen om de weg op te mogen. Uit het onderzoek is naar voren gekomen dat er geen aanwijzingen zijn dat de veiligheidsrisico's bij ZE-bussen groter zijn dan bij fossiel-aangedreven bussen, maar wel dat de risico's anders zijn.

Onderzoeksmethode

Het totaaloverzicht met veiligheidsaspecten is opgesteld aan de hand van een literatuurstudie en het afnemen van interviews. Voor de literatuurstudie zijn 153 wetenschappelijke en semiwetenschappelijke bronnen bestudeerd over veiligheidsaspecten van ZE-bussen. Daarnaast zijn er vijftien deskundigen geïnterviewd. De bevindingen zijn besproken met en becommentarieerd door een begeleidingsgroep, bestaande uit (veiligheids-)experts die vanuit verschillende invalshoeken te maken hebben met ZE-bussen. Het overzicht geeft daarmee een zo compleet mogelijk beeld van de beschikbare kennis op het gebied van veiligheidsaspecten van ZE-bussen.

Geïdentificeerde veiligheidsaspecten

Een groot aantal veiligheidsaspecten dat gepaard gaat met de inzet en exploitatie van ZE-bussen is goed in beeld. Er kan veel geleerd worden van de ervaringen die zijn opgedaan bij batterij- en waterstof-elektrische personenauto's. Echter, op een aantal onderdelen zijn er verschillen (bijv. de grootte van de voertuigen en accupakketten en de druk in de brandstoftank).

Het grootste veiligheidsrisico bij BEV-bussen is het optreden van een *thermal runaway* in het accupakket. Dit is een proces waarbij door een verhoogde temperatuur of interne weerstand in de cellen van accupakketten brand kan ontstaan, waarna toxische gassen vrijkomen.

Bij FCEV-bussen is naar voren gekomen dat één van de belangrijkste veiligheidsaspecten het optreden van een fakkelbrand is. Deze treedt op bij het vrijkomen van waterstof uit de waterstoftank indien deze in aanraking komt met een externe ontstekingsbron. Een ander aspect is het vrijkomen van waterstof in besloten ruimtes, waardoor de waterstof kan ophopen (met mogelijk explosiegevaar als gevolg).

De literatuur en kennis van experts wijzen niet op een hoge kans van optreden van deze veiligheidsrisico's.

Het incidentmanagement van ZE-bussen vraagt om een andere benadering dan bij fossiel-aangedreven bussen. Bij brand is er bij BEV-bussen veel bluswater nodig vanwege de accugrootte en de kans van het opnieuw ontbranden van het accupakket. Daarnaast speelt de grootte van de bussen een rol, omdat oplossingen die voorhanden zijn voor personenauto's niet altijd toepasbaar zijn voor bussen (bijvoorbeeld: dompelcontainers). Het wegslepen en bergen van ZE-bussen komt in de praktijk voor bij incidenten (bijv. bij het stilstaan van een bus), maar bij het bergen van ZE-bussen na brand bestaan nog onduidelijkheden. Momenteel zijn er binnen het werkveld incidentmanagement ontwikkelingen om te kunnen leren van incidenten. Bij deze ontwikkelingen zijn onder andere incidentmanagers maar ook verzekeraars en fabrikanten van bussen betrokken. Zo is er een database met bijbehorend dashboard ontwikkeld door het IFV waarin informatie staat over incidenten met alternatief-aangedreven voertuigen. Ook zijn er aandachtskaarten ontwikkeld door Brandweer Nederland over het bestrijden van incidenten met ZE-voertuigen.

Kennishiaten

Naast bovengenoemde risico's, zijn er ook specifieke veiligheidsaspecten voor ZE-bussen die weinig aan bod komen in de literatuur. De meeste kennishiaten hebben raakvlakken met het incidentmanagement van ZE-bussen. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de veiligheidsrisico's die gepaard gaan met de inzet en exploitatie van ZE-bussen vragen om een andere benadering van het incidentmanagement dan fossiel-aangedreven bussen. In het onderzoek zijn voor de kennishiaten aanbevelingen gedaan voor de wijze waarop de kennishiaten kunnen worden weggenomen. Deze aanbevelingen zijn gespecificeerd per kennishiaat. Hierbij gaat het bijvoorbeeld om het uitvoeren van een risicoanalyse of het voeren van gesprekken met partijen uit het werkveld ZE-bussen.

De kennishiaten die in het onderzoek geïdentificeerd, zijn:

1. Gebrek aan empirische data over de impact ZE-technieken op de omvang van een incident in geval van een botsing.
2. Het proces rondom de Europese typegoedkeuring van ZE-bussen
3. De veiligheidseisen die gesteld worden ten aanzien van ontwerp, functionering en testen van ZE-bussen.
4. Het uitwisselen van kennis en ervaring na incidenten met ZE-bussen;
5. Delen informatie toedracht van incidenten met ZE-bussen.
6. De interactie met de omgeving bij brand met een ZE-bus op een ov-knooppunt.
7. Het bergen van ZE-bussen na een brand.
8. Ontwerprichtlijnen voor het stallen van ZE-bussen in stallingen en busremises.



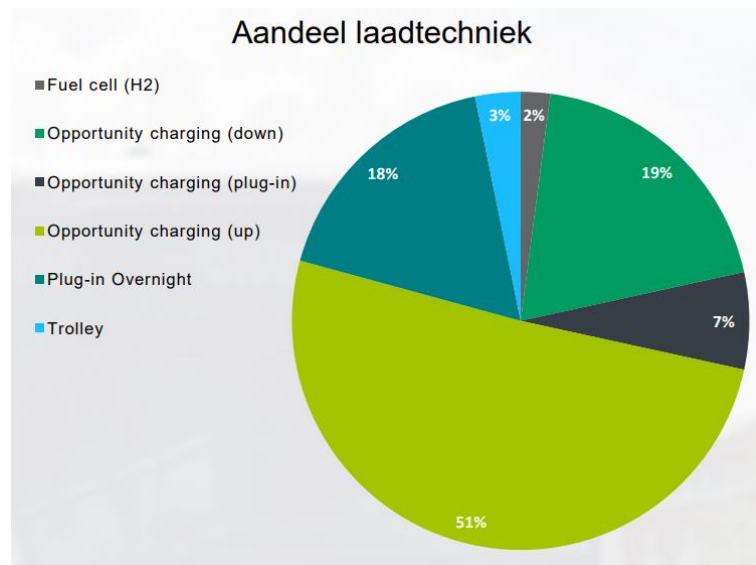
1 Inleiding

1.1 Aanleiding voor het onderzoek

Het Bestuursakkoord Zero Emissie Bussen (BAZEB) beoogt dat per 2025 alle nieuwe bussen zero-emissie (ZE) zijn en per 2030 uitsluitend gebruik te maken van ZE-bussen. Het gaat hierbij om ov-bussen die batterijelektrisch worden aangedreven (BEV-bussen) en om waterstof-elektrische bussen (FCEV-bussen). Diesel- en cng-bussen worden nu al steeds vaker vervangen door ZE-bussen (zie Figuur 1). Deze ZE-bussen met een batterij of brandstofcel (waterstof-elektrische) aandrijving zijn nog relatief nieuw en er is beperktere ervaring met ZE-bussen in vergelijking tot fossiel-aangedreven bussen met een verbrandingsmotor. Randvoorwaarde om de transitie naar ZE-busvervoer te maken, is het borgen van de veiligheid van de ZE-bussen. In de 'Contouren Toekomstbeeld OV 2040' is veiligheid als één van de vijf doelen aangemerkt om vanuit het ov een bijdrage te leveren aan maatschappelijke (ruimtelijke) opgaven rondom economie, woningbouw en leefomgeving (Rijksoverheid, 2019).

Het aandeel ZE-bussen is toegenomen in de afgelopen jaren. Per 1 oktober 2021 zijn er 1.273 BEV-bussen en 28 FCEV-bussen in gebruik.

Figuur 1 - Aantal en aandeel van technologieën in zero-emissie (ZE) bussen in Nederland.



Bron: (CROW, 2021).

Het onderwerp veiligheid in relatie tot ZE-bussen heeft de aandacht van verschillende gremia waar veiligheid wordt behandeld. Omdat de veiligheidsaspecten die gepaard gaan met de inzet van ZE-bussen onderling van elkaar verschillen (van ontwerpisen tot incidentmanagement) en vaak specialistische kennis vergen, worden deze aspecten in verschillende gremia uitgewerkt. Een totaaloverzicht van de veiligheidsaspecten waar rekening mee gehouden dient te worden bij de inzet van ZE-bussen ontbreekt echter nog, evenals een bundeling van de beschikbare kennis.

Doel van onderhavig rapport is het bieden van een totaaloverzicht van veiligheidsaspecten waar rekening mee gehouden moet worden bij de inzet en exploitatie van ZE-bussen vanuit de literatuur en vanuit de praktijk middels interviews met betrokken partijen op het gebied van ZE-bussen. Het betreft een inventariserende studie waarbij het voornaamste doel is om een algemeen beeld te schetsen van de beschikbare kennis over veiligheid van ZE-bussen te bundelen en presenteren. Daar waar er nog een kennisbehoefte is en verder onderzoek nodig is, wordt er een kennishiaat aangegeven waarbij er tevens aanbevelingen worden gedaan voor de wijze waarop de kennishiaten kunnen worden weggenomen.

Vanuit de verschillende gremia en de werkgroep veiligheid onder het BAZEB is er behoefte aan een dergelijk overzicht van informatie. CROW heeft aan CE Delft gevraagd om een overzicht op te stellen van deze veiligheidsaspecten van ZE-bussen waarbij wordt ingegaan welke kennis er beschikbaar is. Het rapport voorziet in de informatiebehoefte van onder meer wegbeheerders, ov-autoriteiten, ov-vervoerders en de Rijksoverheid, het helpt hen om meer inzicht te krijgen in de veiligheidsaspecten die gepaard gaan met de nieuw(st)e zero-emissie-technieken.

Het onderzoek is uitgevoerd met behulp van een begeleidingsgroep, bestaande uit experts op het gebied van ZE-bussen. De begeleidingsgroep heeft gedurende het onderzoek meegelezen en informatie aangeleverd. Een overzicht van de organisaties uit de begeleidingsgroep is weergegeven in Bijlage A.

In een eerder onderzoek van CE Delft zijn de veiligheidsaspecten van elektrische personenauto's onderzocht (CE Delft, 2020). Dit onderzoek naar de veiligheidsaspecten van ZE-bussen bevat eenzelfde opzet en onderzoeksmethode.

1.2 Doel van het onderzoek

Het doel van het onderzoek is tweeledig:

Ten eerste wordt er een zo compleet mogelijk overzicht gepresenteerd van de veiligheidsaspecten die gepaard gaan met de inzet en exploitatie van ZE-bussen. Hierin wordt ingegaan op negen veiligheidscategorieën (zie de inleiding bij Hoofdstuk 3) waarbij er per categorie wordt aangekaart welke informatie beschikbaar is.

Ten tweede inventariseren we kennishiaten vanuit de literatuur en op basis van de interviews. De belangrijkste kennishiaten zijn opgenomen in Hoofdstuk 4. Daarbij zijn ook aanbevelingen gedaan voor de wijze waarop de kennishiaten kunnen worden weggenomen. Deze aspecten kunnen als vertrekpunt fungeren voor verder onderzoek.

In het project wordt getracht om de volgende onderzoeksvragen te beantwoorden:

1. Welke veiligheidsaspecten spelen een rol bij de inzet en exploitatie van ZE-bussen?
2. Welke partijen spelen een rol bij deze veiligheidsaspecten?
3. Welke relevante informatie in binnen- en buitenland is bekend op dit gebied?
4. Welke *lessons learned* zijn er op basis van incidenten met ZE-bussen?
5. Welke veiligheidsaspecten/kennishiaten dienen verder uitgezocht te worden bij inzet en exploitatie van ZE-bussen?
6. Welke randvoorwaarden gelden er voor nader onderzoek van de kennishiaten?

1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de onderzoeksaanpak. Daarbij wordt de afbakening van het onderzoek besproken en ingegaan op de verschillende thema's ten aanzien van de veiligheid die in het onderzoek centraal staan. Tevens geven we hier een analyse op wat voor documenten wij gebruikt hebben voor het literatuuronderzoek. In Hoofdstuk 3 worden de resultaten van het literatuuronderzoek en de interviews behandeld. In Hoofdstuk 4 presenteren we een overzicht van de geïdentificeerde kennisinstellingen en in Hoofdstuk 5 presenteren we de conclusies waarin we antwoord geven op de onderzoeksvragen.



2 Onderzoeksaanpak

2.1 Afbakening

Veiligheidsthema's

In Tabel 1 gaan we in op de verschillende veiligheidsthema's die we behandelen in dit onderzoek. In negen thema's beschrijven we de veiligheidsaspecten die een rol spelen. We sluiten hierbij aan op het onderzoek 'Veiligheid en elektrische personenauto's' dat in 2020 is gepubliceerd door CE Delft (2020).

Tabel 1 - Overzicht veiligheid thema's

#	Onderwerp	Beschrijving
1	Voertuigveiligheid	Hierbij gaat het om veiligheidsaspecten die spelen bij ZE-bussen ten aanzien van de veiligheid van inzittenden, andere weggebruikers, monteurs en veiligheidsdiensten en de eisen waar ZE-bussen aan moeten voldoen.
2	Accupakketten en waterstoftanks	Bij dit onderwerp gaat het om welke risico's schade van batterijen en tanks met zich meebrengen.
3	(Afwegigheid van) geluid	Dit betreft de mogelijke risico's van de lagere geluidsproductie van ZE-bussen voor de verkeersveiligheid.
4	Brandveiligheid	Bij dit thema wordt gekeken naar overeenkomsten en verschillen tussen fossiel-aangedreven en ZE-bussen op het moment dat er een brand ontstaat. Het gaat zowel om de risico's van (spontane)ontbranding als om de risico's tijdens de brand en de benodigde middelen om de brand te bestrijden.
5	Veiligheid in besloten ruimtes	Dit thema ligt in het verlengde van brandveiligheid algemeen en gaat over de aanvullende risico's wanneer de brand in/om een ZE- bus ontstaat in tunnels, remises of busstations.
6	Incidentmanagement	Bij dit thema gaat het om de mogelijk andere handelingsinstructies die nodig zijn voor hulpdiensten bij ongevallen en incidenten met ZE-bussen.
7	Onderhoud en veiligheid	Hier gaat het om de vereiste kennis bij garagepersoneel, monteurs en technici om goed om te kunnen gaan met specifieke veiligheidsaspecten met ZE-bussen.
8	Te water geraking	Hierbij gaat het over mogelijke risico's van elektrocutie wanneer ZE-bussen gedeeltelijk of geheel onder water belanden.
9	Laad- en tankinfrastructuur	Hierbij gaat het om de veiligheid en de risico's van laad- en tankinfrastructuur van ZE-bussen bij het laden of tanken

Voertuigen en technologie

De scope van het onderzoek beperkt zich tot volledig zero-emissie-(ZE)bussen met een batterijelektrische (BEV) aandrijving of brandstofcel-elektrische aandrijving (FCEV) op waterstof.

Hybride (HEV) of plug-in hybride (PHEV) bussen met o.a. een fossiel-aangedreven diesel- of benzinemotor nemen wij niet mee in dit onderzoek, aangezien deze bussen maar gedeeltelijk ZE zijn en niet volledig. Ook bussen met bovenleiding, zoals trolleybussen in Arnhem, nemen wij niet mee in dit onderzoek. Bussen waarbij waterstof gebruikt wordt in verbrandingsmotoren nemen wij niet mee, aangezien deze voertuigen niet volledig ZE zijn.



BEV en FCEV zijn allebei elektrisch-aangedreven bussen waardoor deze samen kunnen worden meegenomen in dit onderzoek.

BEV- en FCEV-bussen maken gebruik van verschillende type technologieën. BEV-bussen maken op dit moment gebruik van een relatief groot lithium-ion-batterijpakket aan boord. De batterijen worden opgeladen door het aansluiten van de bus op het elektriciteitsnet. FCEV-bussen gebruiken een brandstofcel om alle elektrische componenten van de aandrijflijn te voorzien van energie. Hiervoor wordt waterstof getankt zodat de brandstofcel waterstof omzet in elektriciteit. Een FCEV-bus bevat net als een BEV-bus ook een batterijpakket. De batterij in een FCEV-bus is aanwezig om piekvermogen te leveren en om opgewerkte energie van regeneratief remmen op te slaan. FCEV en BEV zijn beide elektrische bussen en hebben hierdoor overeenkomstige systemen (zoals batterij, BMS, elektromotor, etc.). Veiligheidsaspecten op BEV-bussen gelden daarom ook voor FCEV-bussen. Dit onderzoek richt zich op beide type bussen.

Laad- en tankinfrastructuur

Bij het onderwerp laad- en tankinfrastructuur geven wij een beeld van de veiligheidsaspecten die een rol spelen bij het laden en tanken van ZE-bussen. We zoeken hierbij onder andere naar informatie met betrekking tot de veiligheidsaspecten van verschillende manieren van laden, zoals regulierladen, pantograafladen en inductieladen. Ook kijken we naar oplaadmethoden zoals ‘opportunity charging’ en ‘laden op depot’.

Binnen de laad- en tankinfrastructuur kijken we naar de infrastructuur die in contact staat met de bus. Bij elektrisch laden zijn dit de systemen zoals pantografen, laadpalen, laadkabels en de bijbehorende directe aansluiting en bijbehorende charging protocol. We kijken hierbij niet naar de infrastructuur die aangelegd wordt om spanning van het net te distribueren, zoals transformatoren. Deze beschouwen we niet als onderdeel van veiligheidsaspecten van de ZE-bus op zich, maar valt onder veiligheidsaspecten van het laadstation en is dus geen onderdeel van dit onderzoek.

Bij waterstoftanken kijken we naar de tankinstallatie die in contact staat met de bus, zoals de tankslang en bijbehorende apparatuur die direct bij het tanken betrokken is. We bekijken de veiligheidsaspecten van het tanken van waterstof met 350 bar. We kijken ook naar het fuelling protocol dat gebruikt wordt bij het tanken en de communicatie tussen bus en tankinstallatie. Het tankstation zelf, of de productie en het vervoeren van waterstof nemen wij niet mee in dit onderzoek. De veiligheidsaspecten die hier spelen beschouwen we als onderdeel van de waterstofinfrastructuur en niet als veiligheidsaspect van de ZE-bus.

Cybersecurity is een belangrijk aspect binnen onder andere de digitale communicatie tussen bus en de laad- en tankinfrastructuur. Ook de geavanceerde systemen die worden toegepast in de bussen, onder andere voor het monitoren van de busstatus, leiden tot een behoefte aan cybersecurity (Markusik & Butkowski, 2021). Daarmee is cybersecurity een belangrijk onderwerp binnen het thema veiligheid. Het is echter ook een onderwerp dat breder voert dan alleen ZE-bussen en waar een opzichzelfstaand onderzoek meer mogelijkheden biedt om een goed beeld te vormen van het onderwerp. In deze studie laten we cybersecurity daarom buiten beschouwing.



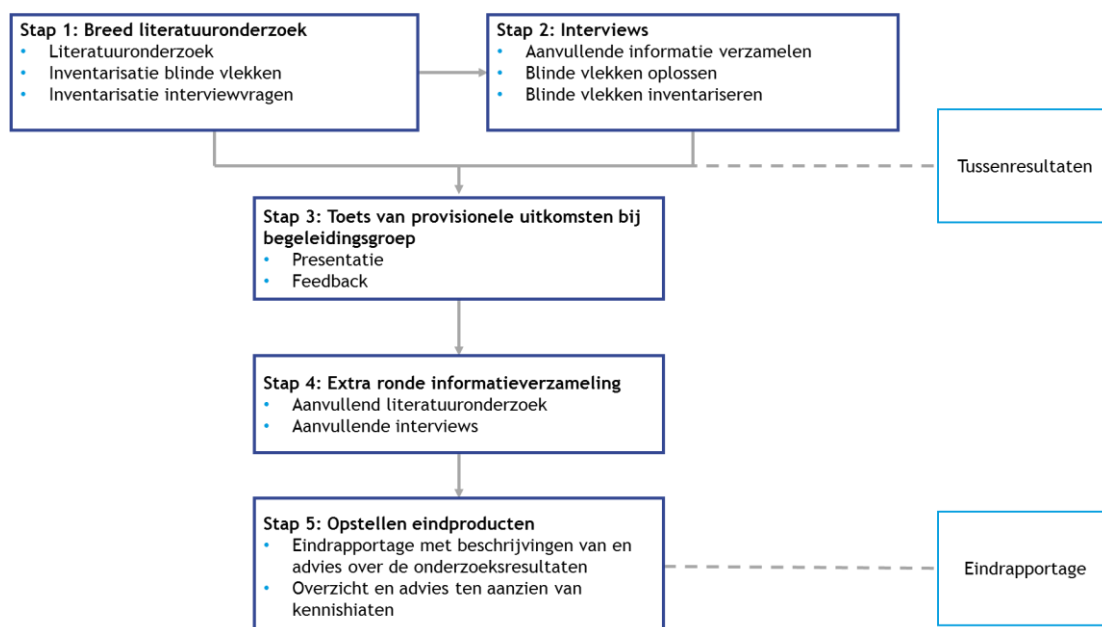
2.2 Onderzoeksmethode

Onderzoekstructuur onderzoek ZE-bussen

De resultaten van het onderzoek zijn verkregen middels een uitgebreid literatuuronderzoek en het afnemen van interviews. De aanpak en structuur van dit onderzoek naar ZE-bussen is gebaseerd op de studie uit 2020 uitgevoerd door CE Delft over de veiligheid van elektrische personenauto's. In Bijlage B staan de belangrijkste conclusies die uit het onderzoek naar personenauto's naar voren zijn gekomen.

In Figuur 2 zijn de verschillende stappen die in dit onderzoek naar ZE-bussen zijn doorlopen weergegeven. Onder de figuur lichten we de belangrijkste stappen nader toe.

Figuur 2 - Onderzoekstructuur



Breed literatuuronderzoek

Het literatuuronderzoek is uitgevoerd om inzichtelijk te maken welke kennis er is op het gebied van veiligheidsaspecten van ZE-bussen. Daarnaast zijn er blinde vlekken naar voren gekomen.

Voor het literatuuronderzoek hebben wij zoveel mogelijk gebruikgemaakt van zowel nationale als internationale bronnen. Er is daarbij gebruikgemaakt van wetenschappelijke (peer reviewed) artikelen, onderzoeks- en beleidsartikelen en grijze literatuur (documenten die niet formeel uitgegeven of commercieel verkrijgbaar zijn, zoals werkdocumenten en nieuwsberichten).

In Paragraaf 2.3 hebben wij een analyse uitgevoerd naar de kwantiteit en aard (wetenschappelijk of anders) van alle gevonden bronnen en hoe deze zijn verdeeld over de negen veiligheidsthema's. Deze analyse geeft een eerste indruk van het eventuele gebrek aan

kennis per veiligheidsthema en vormt een opmaat naar de inventarisatie van kennishiaten (zie ook hieronder).

Interviews

Naast de literatuurstudie zijn interviews afgenomen met vijftien deskundigen die op diverse werkterreinen actief zijn, gerelateerd aan veiligheid van ZE-bussen. Een overzicht van de geïnterviewde organisaties en bedrijven is te vinden in Bijlage B en een overzicht van de interviewvragen in Bijlage C.

Tijdens de interviews zijn twee hoofdlijnen aangehouden. De eerste hoofdlijn betrof het toetsen van en reflecteren op de bevindingen uit het literatuuronderzoek aan de dagelijkse praktijk, inclusief blinde vlekken die uit het literatuuronderzoek naar voren zijn gekomen. Hiermee is inzicht verkregen in de mate waarin de vigerende kennis (uit onderzoek) afwijkt dan wel overeenkomt met de dagelijkse praktijk waar de geïnterviewden mee te maken krijgen. De tweede hoofdlijn in de interviews betrof het inventariseren van vragen die leven bij experts en waar voor hun (vooralsnog) geen antwoord op te geven is. Deze vragen zijn gebruikt voor de inventarisatie van kennishiaten.

Inventarisatie kennishiaten

De bestaande literatuur geeft op zeer (situatie)specifieke vragen doorgaans geen antwoord. Toch kunnen deze tot op heden onbeantwoorde specifieke vragen potentieel belangrijk zijn om mogelijke veiligheidsaspecten in beeld te brengen.

In dit rapport hebben we een prioritering gemaakt van alle vragen die leven onder experts en de meest acute vragen opgenomen in de lijst met kennishiaten. De prioritering is in de eerste plaats gedaan door te kijken of dezelfde (soort) vragen door meerdere geïnterviewden aan de orde werden gesteld. Hoe meer partijen dezelfde (soort) vraag stelden, hoe groter de kans dat deze als kennishiaat is aangemerkt. Vervolgens is door de onderzoekers de haalbaarheid beoordeeld en onderzocht wat er nodig is om de vragen te beantwoorden. Dat wil zeggen dat we een expertoordeel hebben geveld over de mogelijkheid om middels onderzoek (of anderszins) een antwoord te krijgen op deze vragen waarbij de inspanningen in verhouding staan tot het potentiële risico. De uiteindelijke lijst met kennishiaten is besproken in de begeleidingsgroep en waar nodig/gewenst aangevuld. Elk kennishiaat wordt in Hoofdstuk 4 van dit onderzoek toegelicht.

2.3 Literatuuronderzoek en gebruikte bronnen

Voor dit onderzoek zijn in totaal 153 bronnen gevonden en geraadpleegd die te maken hebben met veiligheidsaspecten van ZE-bussen. Daarnaast bouwt het literatuuronderzoek voort op de studie naar de veiligheid van elektrische personenauto's dat in 2020 gepubliceerd is door CE Delft (2020). Voor die studie zijn 280 bronnen bestudeerd waarvan 263 bronnen een publicatiejaar van 2014 of later hebben. De 153 bronnen die voor deze studie zijn bestudeerd, vormen een aanvulling op de resultaten uit de studie naar de veiligheid van elektrische personenauto's. De 15 bronnen zijn veelal specifiek gericht op de veiligheid van ZE-bussen, of bevatten informatie over veiligheidsaspecten van waterstof. Dit zijn onderwerpen die in de personenautostudie niet aan bod zijn gekomen.



In Tabel 2 is een verdeling gegeven van de gevonden bronnen naar elk van de negen onderwerpen en naar publicatiejaar en in Tabel 3 een verdeling van bronnen naar type literatuur. Er is te zien dat het aantal bronnen dat we hebben gevonden sterk verschilt per thema. Voor de thema's 'afwezigheid van geluid' en 'te water geraking' zijn weinig bronnen gevonden die specifiek gerelateerd zijn aan de veiligheidsaspecten van ZE-bussen. Echter, de bronnen die zijn gebruikt geven, in aanvulling op informatie die uit de interviews naar voren komen, een goed beeld van de veiligheidsaspecten die spelen in beide thema's.

De meeste bronnen zijn gevonden over de onderwerpen 'incidentmanagement', 'brandveiligheid' en 'laadinfrastructuur'. Dit zijn actuele onderwerpen en veel van de bronnen die wij hebben gevonden geven informatie over een combinatie van deze onderwerpen.

Tabel 2 - Aantal relevante publicaties per thema naar publicatiejaar¹

Onderwerp literatuur	Publicatiejaar																Totaal
	2003	2005	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Onbekend	
Voertuigveiligheid					1	1	1	2	2	2	1	2	2	11	10	1	36
Accupakketten en waterstoftanks		1	1						2	1			1	6	7	1	20
Afwezigheid van geluid													1	3	2		6
Brandveiligheid	1						1	2	1	4	4	1	2	14	9		40
Veiligheid in besloten ruimtes	1			1				1	1		4	1	1	8	5	1	23
Incidentmanagement	1			1			1	1	2	3	4	2	8	16	7	2	48
Te water geraking				1				2	1	1	1	2	1	8	1		18
Onderhoud & veiligheid											1			3			4
Laad- en tankinfrastructuur	1	1					1	1	1	1	1	4	11	16	10		49

Tabel 3 - Aantal relevante publicaties per thema naar type literatuur

Onderwerp literatuur	Type literatuur					Totaal
	Grijze literatuur	Nieuws	Overig	Website/blog	Wetenschappelijk	
Voertuigveiligheid	11	2		9	14	36
Accu-pakketten en waterstoftanks	4			10	6	20
Afwezigheid van geluid	3	2			1	6
Brandveiligheid	15	7		4	14	40
Veiligheid in besloten ruimtes	10	2		4	7	23
Incidentmanagement	20	6		7	15	48
Te water geraking	9			2	7	18
Onderhoud & veiligheid	2	1			1	4
Laad- en tankinfrastructuur	19	7		13	10	49
Totaal aantal onderzoeken per type	54	22	1	39	34	153

¹ De som van het aantal bronnen dat in deze tabel is weergegeven ligt hoger dan 153. Dit komt omdat er regelmatig bronnen zijn gebruikt voor meerdere thema's.

In Tabel 4 is weergegeven wat de verdeling is in scope van de literatuur. Daarnaast is weergegeven hoeveel onderzoeken daarvan relevant zijn voor BEV- en FCEV-bussen. Daarin valt op dat relatief veel literatuur een nationale scope heeft. Dit is waarschijnlijk te verklaren doordat Nederland vooroploopt in het aantal ZE-bussen dat rondrijden (althans in Europa) en daardoor meer kennis heeft opgedaan in vergelijking tot andere (Europese) landen. Het aantal relevante onderzoeken voor BEV- en FCEV-bussen is vergelijkbaar. Voor BEV-bussen is regelmatig gebruikgemaakt van de studie naar personenauto's. In de studie naar personenauto's zijn 280 bronnen uit de literatuur onderzocht waardoor het daadwerkelijke aantal gebruikte bronnen voor BEV-bussen hoger uitvalt.

Tabel 4 - Aantal relevante publicaties uitgesplitst naar scope

Scope van het onderzoek	Aantal onderzoeken totaal	Aantal relevante onderzoeken BEV	Aantal relevante onderzoeken FCEV
Europees	22	11	13
Internationaal	46	24	32
Nationaal	85	48	43
Eindtotaal	153	80	88

3 Onderzoeksresultaten

In dit hoofdstuk presenteren wij de resultaten van ons onderzoek. In negen thema's beschrijven we de veiligheidsaspecten die een rol spelen. We sluiten hierbij aan op het onderzoek 'Veiligheid en elektrische personenauto's' (CE Delft, 2020). In Paragraaf 2.1 zijn de thema's verder toegelicht.

1. Voertuigveiligheid.
2. Batterij- en tankschade.
3. Afwezigheid van geluid.
4. Brandveiligheid.
5. Veiligheid in besloten ruimtes.
6. Incidentmanagement.
7. Onderhoud en veiligheid.
8. Te water geraking.
9. Laad- en infrastructuur.

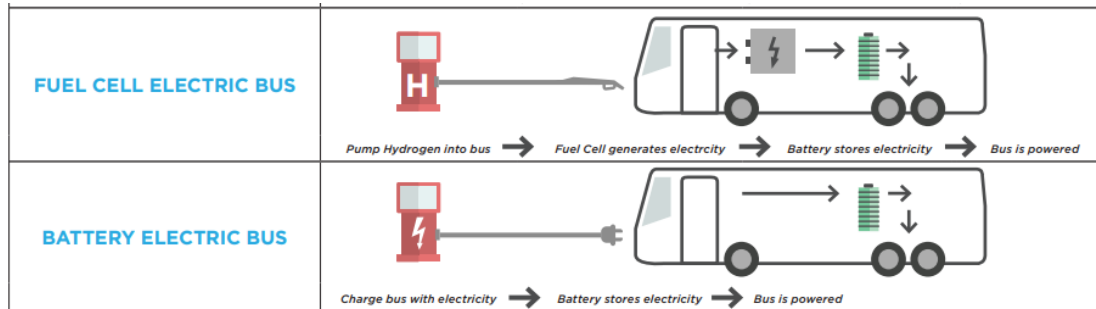
Per thema schetsen we een beeld van de resultaten uit het literatuuronderzoek en de interviews, waarna we afsluiten met een conclusie. In Hoofdstuk 4 presenteren we de hoofdconclusie. Voordat we ingaan op deze thema's, zullen we starten met een inleidende paragraaf over de batterij- en waterstof-elektrische bussen waarbij tevens wordt ingegaan op een aantal kenmerkende fysische eigenschappen die bepalend zijn voor het schetsen van veiligheidsaspecten. Deze dient ter ondersteuning van de paragrafen over de negen thema's die daarop volgen.

3.1 Inleiding BEV- en FCEV-bussen en waterstof

Werking BEV- en FCEV-bussen

De werking tussen BEV- en FCEV-bussen verschilt, dit is weergegeven in Figuur 3. Bij een BEV-bus wordt de bus geladen met elektriciteit, deze wordt opgeslagen in een accu. De elektriciteit wordt gebruikt voor de aandrijving van de bus via een elektromotor. Net als een BEV-bus, wordt een FCEV-bus aangedreven door elektromotoren. In een FCEV-bus wordt de energie uit waterstof gehaald in plaats van uit het accupakket. Dit gebeurt doordat er in de brandstofcel een reactie plaatsvindt tussen waterstof uit opslagtanks en zuurstof waarbij er energie vrijkomt in de vorm van elektriciteit (ANWB, sd). Het restproduct van deze reactie is water. Met de elektriciteit wordt de elektromotor in werking gezet en wordt de bus aangedreven.

Figuur 3 - Werking van een FCEV-bus en een BEV-bus



Bron: (MRCagney, 2017).

Zowel BEV-bussen als FCEV-bussen zijn dus elektrisch-aangedreven bussen. Bij elektrisch-aangedreven voertuigen zijn componenten met een hoog voltage aanwezig in het aandrijfsysteem.

Fysische eigenschappen van waterstof

Om een beeld te kunnen schetsen van de veiligheidsaspecten van FCEV-bussen is het van belang om de fysische eigenschappen van waterstof in kaart te brengen:

- Waterstof is 14x lichter dan lucht (Iosh magazine, 2021; Foorginezhad, et al., 2021; Milojević, 2014). Het gevolg hiervan is dat waterstof opstijgt en er zich in de open lucht, op grondniveau, niet gemakkelijk een explosieve wolk zal ontwikkelen die in aanraking kan komen met ontstekingsbronnen. In besloten ruimtes (zoals bijv. parkeergarages) kan waterstof zich ophopen (in holle ruimtes) bij het plafond en daar een explosieve wolk vormen (IFV, 2020a).
- Waterstof is ontvlambaar en heeft een relatief lage ontstekingsenergie (Foorginezhad, et al., 2021; ECN, 2009; NRDC, 2021; Bethoux, 2020; Civitas; TNO, 2013).
- Uit de literatuur komt naar voren dat de lucht rondom een vlam bij waterstof niet zo heet is als een vlam bij benzine. Ook is er meer zuurstof nodig voor het ontbranden van waterstof dan voor het ontbranden van benzine (NRDC, 2021).
- Het explosiegebied van waterstof loopt van 4,1% (volumepercentage waterstof in lucht) tot 74,8%. Ter vergelijking: voor diesel is dit 0,6-6,5% en voor methaan (aardgas) 4,4-16,0% (BA Systemen, 2020).
- Bij ontbranden is de vlam van waterstof onzichtbaar (Bethoux, 2020; Waterstofnet, 2021). Vlammen kunnen worden gedetecteerd met behulp van een thermische camera of uv-metingen (Waterstofnet, 2021). De vlam is wel zichtbaar als zich bijvoorbeeld stofdeeltjes in de lucht bevinden die ontbranden.
- Waterstof is geurloos (ECN, 2009).
- Waterstof is smaakloos (ECN, 2009; Waterstofnet, 2021).
- Waterstofgas kan op sommige metalen oppervlakten leiden tot een reactie en atoomvorming van waterstof (Waterstofnet, 2021; Foorginezhad, et al., 2021). Dit risico kan worden afgedekt door de juiste materiaalkeuze of het aanbrengen van een coating (Bethoux, 2020).
- Waterstof is kankerverwekkend (Milojević, 2014).
- Waterstof is niet giftig, veroorzaakt geen milieuvervuiling (ECN, 2009; Milojević, 2014) en leidt niet tot verstikkingsgevaar (Waterstofnet, 2021).
- De zelfontbrandingstemperatuur is 585 °C graden (Waterstofnet, 2021).

3.2 Voertuigveiligheid

In deze paragraaf lichten we toe welke veiligheidsaspecten een rol spelen bij de algemene voertuigveiligheid van ZE-bussen.

3.2.1 Studies en publicaties

In CE Delft (2020) is in kaart gebracht welke risicofactoren een rol spelen bij de voertuigveiligheid van (batterij)elektrische personenauto's. Hierbij is gekeken naar factoren zoals de massa van auto's, het acceleratievermogen, het zwaartepunt, het remmen en naar geavanceerde systemen. De conclusie was dat er veel overeenkomsten zijn tussen elektrische personenauto's en fossiel-aangedreven brandstofauto's, en dat de technische verschillen duidelijk in beeld zijn. Elektrische personenauto's komen in botstesten even goed of beter naar voren als fossiel-aangedreven personenauto's. Dit komt onder andere door ingebouwde veiligheids- en assistentiesystemen.

Net als bij personenauto's zijn veel veiligheidseisen voor ZE-bussen niet anders dan bij fossiel-aangedreven bussen, maar er zijn wel technische verschillen. De aandrijflijn van een ZE-bus is anders dan bij fossiel-aangedreven bussen en daarnaast zijn ZE-bussen vanwege de elektrische aandrijving voorzien van een recuperatief remsysteem. In deze paragraaf lichten we de verschillen en overeenkomsten tussen de verschillende soorten bussen verder toe.

Uit de literatuur komen volgende verschillen naar voren tussen ZE-bussen en andersoortige bussen:

- Aandrijflijn: een ZE-bus wordt (mede) aangedreven door een elektromotor.
- Massa: het leeggewicht van ZE-bussen die rondrijden is op dit moment meestal groter dan van andere bussen. In Tabel 5 zijn de massa's van verschillende soorten bussen weergegeven.
- Configuratie: de configuratie van een ZE-bus kan per bus verschillen (en wijkt af van andere bussen) doordat het accupakket en de elektromotor op verschillende plekken in de bus geplaatst kunnen worden. Ook de mogelijke aanwezigheid van een pantograaf leidt tot een andere configuratie van de bus.
- Recuperatief remmen: bij het afremmen van een ZE-bus en bij heuvelaf rijden wordt de batterij opgeladen (CROW, 2020c).
- Systemen: bussen zijn doorgaans uitgerust met systemen om veiligheid te waarborgen, zoals geavanceerde systemen die helpen bij het remmen en automatische snelheidsaanpassing. ZE-bussen zijn daarnaast uitgerust met systemen die de staat van het accupakket en waterstoftank monitoren.
- Regelgeving: veiligheidsaspecten van bussen worden anders door elektrificatie en automatisering en hier is aangepaste regelgeving voor nodig.

In deze paragraaf bespreken we wat bovenstaande kenmerken voor effect hebben op de veiligheid van de inzittenden en de omgeving van de bus.

Aandrijflijn

ZE-bussen zijn uitgerust met een elektromotor die wordt aangedreven door een accupakket of brandstofcel. FCEV-bussen zijn daarnaast uitgerust met een waterstoftank om de brandstofcel van waterstof te voorzien. Beide aspecten brengen andere risico's met zich mee bij incidenten dan bij incidenten met fossiel-aangedreven bussen. In CE Delft (2020) zijn de veiligheidsrisico's van accupakketten uitgebreid in beeld gebracht. In Paragraaf 3.3 vullen we dit aan met specifieke veiligheidsaspecten die gelden voor BEV- en FCEV-bussen.

Massa

Alle soorten ov-bussen hebben een grote massa, dit is weergegeven in Tabel 5. Op dit moment is de massa van de meeste ZE-bussen die rondrijden ongeveer 2.000 kg tot 2.500 kg groter dan de massa van een dieselbus. Dit geldt niet voor de nieuw ontwikkelde Ebusco 3.0 die een leeggewicht heeft van 8.500 kg. Deze bus zal vanaf april 2022 rondrijden in Nederland (Ebusco, 2021).

Tabel 5 - Massa's van verschillende soorten bussen

Bustype	Massa (kg)	Voorbeeld fabrikant en model
Dieselbus (12 m)	~10.500	VDL Citea SLF-120 D
BEV-bus (12 m)	~12.500	VDL Citea SLF-120 E
FCEV-bus (12 m)	~13.200	Mercedes Benz Citaro F-Cell hybrid
BEV-bus	~8.500	Ebusco 3.0

Bronnen: Wikipedia (VDL Citea), (Transdev, 2020), (Daimler, 2009), (Biind magazine, 2021), (CROW, 2020c).

De grote massa van ov-bussen heeft met name effect op kwetsbare verkeersdeelnemers omdat het verschil in massa groot is bij een aanrijding tussen een bus en een voetganger of tweewieler. De schadelijke gevolgen kunnen daardoor voor voetgangers en tweewielers groot zijn (CE Delft, 2020). Dit geldt voor alle soorten ov-bussen en niet alleen voor ZE-bussen.

Configuratie

Ten opzichte van fossiel-aangedreven ov-bussen zijn ZE-bussen uitgerust met een accupakket (in het geval van een FCEV kleiner dan bij een BEV-bus, zie Paragraaf 3.3) en/of waterstoftank in combinatie met een elektromotor in plaats van een brandstoftank met een brandstofmotor. Daarnaast bestaan er ZE-bussen die zijn uitgerust met een pantograaf op het dak van de bus.

De accupakketten kunnen op verschillende plekken in de bus geplaatst worden, zoals op het dak van de bus of onder de vloer (midden-, achter- of voorin de bus) of een combinatie hiervan. In Figuur 4 zijn enkele mogelijke configuraties weergegeven.

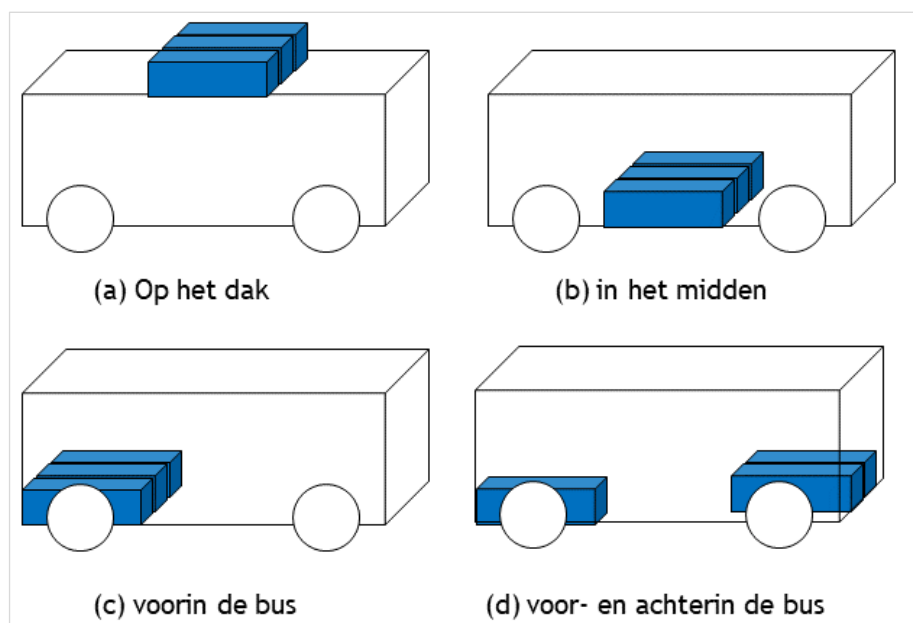
In de literatuur wordt het volgende beschreven over het effect van de positionering van accupakketten op de voertuigveiligheid:

- In Spirka & Kepkaa (2015) is een computersimulatie beschreven waaruit blijkt dat de plaatsing van het accupakket geen effect heeft op de constructieve veiligheid van de bus (Spirka & Kepkaa, 2015). Het effect op de omgeving is hierin niet meegenomen.
- De plaatsing van het accupakket heeft tot gevolg dat het zwaartepunt van een voertuig verandert. Het zwaartepunt heeft een relatie met de stabiliteit van het voertuig (Mazumder, et al., 2012). Bij plaatsing van het accupakket op het dak van de bus komt het zwaartepunt hoger te liggen dan bij plaatsing in de vloer van de bus (Insideevs, 2021). Dit kan gevolgen hebben voor de stabiliteit van de bus maar dit wordt in de literatuur niet genoemd als een veiligheidsrisico.
- In Mazumder et al. (2012) is een computersimulatie uitgevoerd waarbij het accupakket op drie verschillende posities geplaatst is onder de vloer van het voertuig (voorin, in het midden en achterin). Uit de simulatie is naar voren gekomen dat de verticale belasting op de banden verandert als gevolg van de positie van het accupakket. Er is niet vermeld of dit leidt tot veiligheidsrisico's.

- In CE Delft (2020) is thermal runaway naar voren gekomen als het grootste risico bij het gebruik van accupakketten in elektrische personenauto's. Eén van de aspecten die hierbij een rol spelen, is het propageren van thermal runaway tussen verschillende cellen in het accupakket (zie ook Paragraaf 3.3). Mogelijk gaat dit ook op als er verschillende accupakketten bij elkaar geplaatst worden. In de literatuur hebben we geen informatie gevonden die dit onderschrijft.

In bovenstaande punten wordt beschreven wat de configuratie van accupakketten voor impact heeft op de voertuigveiligheid bij elektrische voertuigen. Een beschrijving of kwantificering van de veiligheidsaspecten als gevolg van plaatsing van accupakketten in een bus hebben wij echter niet gevonden.

Figuur 4 - Enkele configuraties van accupakketten in een ZE-bus



Bron: Mazumder, et al. (2012).

Waterstoftanks kunnen net als accupakketten op verschillende plekken in de bus gepositioneerd worden, maar liggen vaak op het dak van de bus (Brandweer Nederland, 2018). Over de gevolgen voor de veiligheid hebben wij geen literatuur gevonden, behalve uit een pilot met een waterstofaanhanger. In het onderzoek is aangegeven dat er kans ontstaat op het scenario dat voetgangers zich tussen de bus en de aanhanger begeven (SWOV, 2020). Dit is echter geen risico dat ontstaat als gevolg van waterstof of de waterstoftank. Daarnaast is de verwachting dat bussen met waterstofaanhangers niet meer zullen worden gaan toegepast waardoor dit risico in de toekomst niet zal optreden. Specifieke veiligheidsaspecten door het gebruik van waterstoftanks komen in Paragraaf 3.3 aan bod.

Remmen

In CE Delft (2020) zijn de voor- en nadelen van een recuperatief remsysteem opgesomd. We hebben geen aanvullende literatuur gevonden die specifiek ingaat op mogelijke veiligheidsrisico's van recuperatief remmen bij ZE-bussen.

Systemen

Voor alle soorten ov-bussen zien wij de volgende ontwikkelingen:

- Het Europees Parlement heeft groen licht gegeven voor het opnemen van nieuwe minimale veiligheidseisen voor alle voertuigen, waaronder voor bussen. Deze eisen worden vanaf 2022 van kracht. Dit zijn onder andere het Autonomous Emergency Brake (AEB)-systeem en het Intelligente SnelheidsAdaptatie (ISA)-systeem. Daarnaast zullen nieuwe voertuigen voorzien worden van een datarecorder. Deze recorder zal data opslaan in de seconden voor een incident ten behoeve van analyse achteraf (ETSC, 2019).
- Daarnaast kunnen in bussen geavanceerde systemen worden toegepast om de veiligheid van inzittenden en de omgeving te waarborgen. Deze systemen zijn veelal onafhankelijk van de aandrijving, zoals bijv. (intelligente) camera- of monitoringssystemen om het zicht van de chauffeur te vergroten en ultrasone obstakeldetectie voor het waarnemen van obstakels in de omgeving van de bus (Brigade, 2020). In Noord-Ierland zijn deze systemen toegepast bij 145 ze- en low-emission-(LE) bussen (ITTHub, 2020). In de Bus Safety Standard in London zijn daarnaast ook maatregelen opgenomen tegen het spontaan rollen van de bus (Intelligent Transport, 2019).

Specifiek worden in ZE-bussen de volgende geavanceerde systemen toegepast:

- Het Battery Management System (BMS): een systeem dat de status van het accupakket monitort op bijvoorbeeld temperatuurverschillen (CE Delft, 2020).
- Sensoren met terugkoppelingssysteem aan de bestuurder voor het tijdig signaleren van waterstoflekkage. De veiligheidssystemen zorgen ervoor dat bij calamiteiten de waterstoftank wordt afgesloten en dat de enige lekkage kan bestaan uit de in het leidingwerk aanwezige waterstof (AIChE Academy, 2020).
- In ZE-bussen zijn botsensoren ingebouwd die zijn ontworpen om een veilige uitschakeling te activeren die de waterstof onder hogedruk in de tank vergrendelt en de hoogspanningscomponenten van het systeem isoleert (Sustainable bus, 2019).

We hebben geen indicatie gevonden dat deze systemen onvoldoende functioneren.

Regelgeving

In (Kim, 2020) komt naar voren dat er behoefte is aan standaarden binnen de industrie voor ZE-(waterstof) bussen. Ook zijn er internationale afspraken en regulering nodig op het gebied van veiligheid en om risico's bij incidenten inzichtelijk te maken. Dit geldt ook voor monitoring, onderhoud en tussentijdse inspecties voor veiligheid (assessments) (Kim, 2020). Er is wel regelgeving beschikbaar over onder andere waterstof technologie, brandstofcel-technologie, het tanken van waterstof en de kwaliteit van waterstof (Fuel Cell Electric Buses, 2021). Daarnaast is er regelgeving voor onderdelen van elektrische bussen opgenomen in UN UCE 100.2 (Spirka & Kepkaa, 2015).

Om tegemoet te komen aan de behoefte aan extra regelgeving op weg naar zero-emissie, heeft de gemeente London een Bus Safety Standard ontwikkeld samen met producenten en operatoren van bussen (Intelligent Transport, 2019). In de standaard zijn maatregelen opgenomen in vier categorieën, namelijk:

1. Assistentie voor de buschauffeur.
2. Partner assistentie voor andere weggebruikers.
3. Partner bescherming voor andere weggebruikers.
4. Bescherming van de inzittenden.

De Europese Commissie stelt toelatingseisen voor de typegoedkeuring van FCEV-bussen. Voor FCEV-bussen wordt de GTR13 gebruikt (Global Technical Regulation). GTR13 dient als basis voor de nationale wettelijke normen voor FCEV-veiligheid in Noord-Amerika, Japan, Korea en de EU. De GTR definieert veiligheidseisen voor deze voertuigen, specificaties over de toegestane waterstofniveaus in de tanks, botsproeven en toegestane waterstofemissies in uitlaatgassen (EC, 2017b). Elektrische voertuigen, waaronder bussen, vallen onder de GTR20 (UNECE, 2018). Wanneer een BEV- of FCEV-bus goedgekeurd wordt in de EU is de bus toegestaan in alle EU-landen.

Het StaSHH-consortium bestaat uit 25 bedrijven en organisaties uit de waterstofsector ontvangt 7,5 miljoen euro subsidie voor het testen van de eerste Europese standaard voor brandstofcellen, stack-modules, interfaces en testprotocollen voor Heavy Duty Vehicles. Hieronder vallen ook bussen (Nedstack, 2021).

Praktijktesten en simulaties

In CE Delft (2020) is aangetoond dat de veiligheid van BEV-personenauto's in botstesten niet onderdoet voor fossiel-aangedreven personenauto's. In CE Delft (2020) is niet gekeken naar botstesten met waterstofauto's. In dit onderzoek hebben we onderzocht of er literatuur beschikbaar is over botstesten met bussen; deze hebben we niet kunnen vinden voor fossiel-aangedreven bussen of ZE-bussen. Op de website van de DEKRA staat vermeld dat het uitvoeren van botstesten niet noodzakelijk is voor het verkrijgen van een typegoedkeuring voor bussen, maar dat busfabrikanten vrijwillig botstesten laten uitvoeren (DEKRA, 2021). Resultaten hiervan hebben wij echter niet kunnen vinden.

Omdat er geen literatuur beschikbaar is over resultaten van botstesten met ZE-bussen, zullen we in deze paragraaf waar mogelijk aanvullen met resultaten van botstesten met waterstofauto's om een zo compleet mogelijk beeld te kunnen geven veiligheidsaspecten bij botstesten met BEV- en FCEV-voertuigen. In grote lijnen bevat een FCEV-auto dezelfde systemen als een FCEV-bus. Een mogelijke verklaring voor het gebrek aan literatuur over botstesten met ZE-bussen is dat het uitvoeren van praktijktesten met bussen duur is (Spirka & Kepkaa, 2015). Daarom zullen we de resultaten van praktijktesten aanvullen met resultaten van computersimulaties uit de literatuur.

ZE-personenauto's doen op het gebied van veiligheid niet onder voor fossiel-aangedreven personenauto's in botstesten en simulaties, zowel bij frontale en zijwaartse botsingen als bij aanrijdingen vanachter. Uit een computersimulatie met ZE-bussen komt hetzelfde beeld naar voren. Naast de resultaten in CE Delft (2020) zijn er diverse testresultaten die dit aantonen:

Botstesten met (waterstof) personenauto's:

- In Lee et al. (2011) zijn botstesten uitgevoerd met waterstofauto's. Hierbij zijn botsingen uitgevoerd op zowel de voor- als zijkant van de auto's. Ook zijn er verschillende situaties beschouwd, namelijk een botsing in een stilstaande situatie (aanrijding door een bewegend ander voertuig) en in de rijdende situatie. De conclusie is dat er geen waterstoflekkage is opgetreden als gevolg van de botstesten. De dummies die gebruikt zijn bij de testen, vertoonden geen letsel.
- De Green Car Future heeft verschillende botstesten met waterstofauto's in beeld gebracht. Bij al deze testen is er geen waterstoflekkage opgetreden en hebben er geen plotselinge ontbrandingen of explosies plaatsgevonden (Green Car Future, 2018)
- Bij diverse botstesten met een Hyundai Motor NEXO is de waterstoftank niet beschadigd geraakt (Hyundai, 2020).



Computersimulatie met ZE-bussen:

- In Spirka & Kepkaa (2015) zijn verschillende (bots)simulaties uitgevoerd met de BEV-bussen. Hierbij zijn accupakketten zowel aan de zij- als achterkant van de bus geplaatst. In de modellen zijn alleen lokale vervormingen zichtbaar bij acceleraties, deze zijn kleiner bij langzaam accelereren. Conclusie van het onderzoek is dat de acceleratie op het moment van impact invloed heeft op de lokale vervormingen, maar dat incidenten niet zullen leiden tot een verandering van de constructieve veiligheid van de bus (Spirka & Kepkaa, 2015).

Het gevolg van het gebrek aan resultaten van botstesten, is dat er een gebrek is aan empirische data over de impact van ZE-technieken en op de omvang van het incident.

3.2.2 Interviews

Het algemene beeld dat uit de interviews naar voren is gekomen, is dat het reizen met een ZE-bus in Nederland veilig is. Er is geen afwijkend aantal incidenten of gebreken genoemd in de interviews ten opzichte van fossiel-aangedreven ov-bussen.

In interviews met gemeenten en met het thema laadinfrastructuur is de plaatsing van accupakketten en pantografen op het dak van de bus genoemd als aspect om rekening mee te houden bij het inzetten van de bussen. Hierbij gaat het met name om aanrijdrisico's met bijvoorbeeld een laag viaduct. In Rotterdam is daarvoor op een locatie de weg verlaagd onder bestaande viaducten. Uit de interviews is naar voren gekomen dat dit niet direct een groot risico is, zolang er rekening wordt gehouden met doorrijdhoogtes op de routes.

Een punt dat in meerdere interviews aan bod is gekomen, is de typegoedkeuring van bussen. Gemeenten gaan ervan uit dat als er een typegoedkeuring is, de bus aan alle veiligheidseisen voldoet. Verder is naar voren gekomen dat er onduidelijkheid bestaat over de veiligheidseisen die gesteld worden aan Europese typegoedkeuringen van bussen. Deze onduidelijkheid bestaat niet alleen voor ZE-bussen maar voor bussen in het algemeen. Enerzijds hebben incidentbestrijders aangegeven dat het lastig is om te achterhalen hoe de bus is opgebouwd die betrokken is bij een incident. Anderzijds zijn er systemen beschikbaar om voertuiggegevens te verkrijgen op basis van kenteken.

Ten aanzien van de massa is aangegeven dat de totale massa van een ov-bus maximaal 19.000 kg is, inclusief passagiers, ongeacht de brandstofsoort waarmee de bus aangedreven wordt. Deze limiet is ingesteld om trillingen op de omgeving te beperken. In de praktijk betekent het dat ov-bussen met een hoog leeggewicht, minder passagiers mee kunnen nemen ten opzichte van ov-bussen met een lager leeggewicht om te voldoen aan de richtlijn.

Conclusies

We hebben weinig literatuur gevonden die specifiek gaat over de voertuigveiligheid van ZE-bussen. De literatuur die beschikbaar is, gaat veelal over personenauto's of alle soorten bussen. Wat wel duidelijk naar voren komt uit de literatuur, zijn de technische verschillen tussen ZE-bussen en fossiel-aangedreven ov-bussen en de mogelijke veiligheidsaspecten die daarmee gepaard gaan. Er bestaat nog onduidelijkheid over het effect op de veiligheid als gevolg van configuratie van accupakketten en waterstoftanks:

1. Bij plaatsing op het dak van de bus ontstaat het risico op aanrijding bij lage onderdoorgangen. Dit is te ondervangen door controle op routes uit te voeren op de hoogte van onderdoorgangen.



2. Daarnaast zijn er geen veiligheidsrisico's naar voren gekomen door de configuratie van accupakketten en waterstoftanks. Plaatsing op het dak zorgt ervoor dat het zwaartepunt hoger komt te liggen wat invloed heeft op de stabiliteit van de bus. Onderzocht zou kunnen worden welk effect dit heeft in verschillende situaties.
3. Verder kan een groot accupakket leiden tot het risico op overslag van thermal runaway naar het hele pakket. Onderzocht zou kunnen worden wat het effect is op het propageren van thermal runaway tussen cellen als het accupakket in bijvoorbeeld twee delen op verschillende locaties in de bus wordt toegepast.

We hebben geen resultaten van botstesten kunnen vinden van fossiel-aangedreven of ZE-bussen. Het is onduidelijk of botstesten worden uitgevoerd en wat daar eventueel de resultaten van zijn. Daarnaast is het uitvoeren van botstesten bij bussen duur, waardoor er bijvoorbeeld wordt uitgeweken naar het uitvoeren van computersimulaties. Het gevolg van het gebrek aan resultaten van botstesten, is dat er een gebrek is aan empirische data over de impact van ZE-technieken en op de omvang van het incident.

Er bestaat onduidelijkheid over de veiligheidseisen die gesteld worden aan Europese typegoedkeuring van bussen. We bevelen daarom aan om in kaart te brengen welke eisen er gesteld worden en daarbij aandacht te hebben voor bussen in het algemeen en voor ZE-bussen.

3.3 Accupakketten en waterstoftanks

In deze paragraaf gaan we in op de veiligheidsaspecten die een rol spelen bij accupakketten en waterstoftanks.

3.3.1 Studies en publicaties

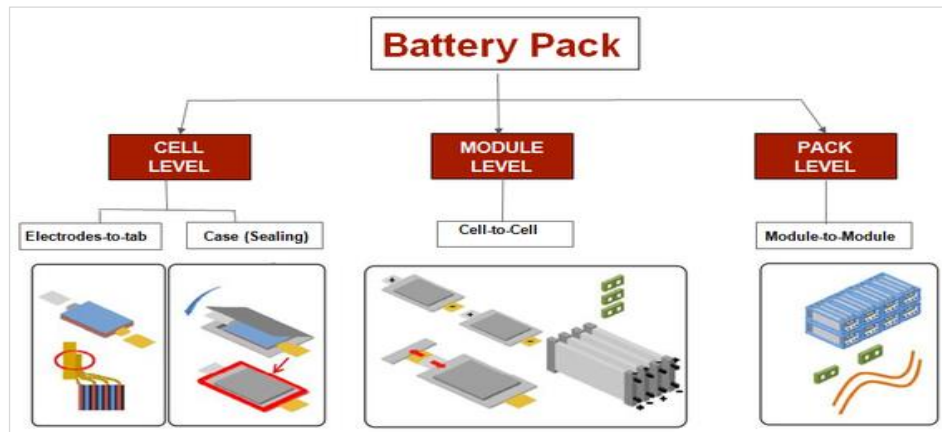
Veiligheidsaspecten accupakketten

In CE Delft (2020) zijn de veiligheidsrisico's van accupakketten in kaart gebracht. Daarin is naar voren gekomen dat het grootste zorgpunt bij accupakketten wordt veroorzaakt door thermal runaway. Dit is een proces waarbij door een verhoogde temperatuur of interne weerstand in de cellen van accupakketten brand kan ontstaan, waarna toxische gassen vrijkomen. De mitigerende maatregelen uit de literatuur zijn veelal theoretisch van aard en zijn nog weinig toegepast in de praktijk. Eén van de systemen die wel wordt toegepast is het zogenoemde Battery Management System (BMS). Dit systeem waarborgt de veiligheid van het accupakket door onder andere de temperatuur in het accupakket te monitoren. Daarnaast is uit de studie (CE Delft, 2020) naar voren gekomen dat het aantal praktijkproeven dat is uitgevoerd met accupakketten schaars is.

Het verschil tussen BEV-bussen en -personenauto's is dat de accupakketten van de bussen groter zijn dan bij personenauto's omdat er meer capaciteit nodig is om de bus te laten rijden. Ter vergelijking: een accupakket in een personenauto heeft gemiddeld een capaciteit van 60,8 kWh (EV database, 2021) en het accupakket van een 12 m-bus van Ebusco heeft een capaciteit van 350 kWh, met de optie om te kiezen voor een accupakket van 400 kWh (Ebusco, 2021). Ook een FCEV-bus heeft een accupakket, al is deze klein in vergelijking tot een BEV-bus. Voor een FCEV Daimler Citaro is dit bijvoorbeeld 26,9 kWh. Een accupakket wordt samengesteld uit modules die bestaan uit batterijcellen, zie Figuur 5. Dit betekent dat er in het accupakket van een BEV-bus meer modules en cellen worden toegepast dan bij een personenauto.



Figuur 5 - Opbouw van een accupakket



Bron: (UFO Battery, 2020).

Een ander verschil tussen batterijelektrische bussen en -personenauto's is de plaatsing van het accupakket in het voertuig. Bij een personenauto bevindt het accupakket zich altijd in de auto (bijv. onder de motorkap), terwijl het accupakket bij een batterijelektrische bus zich ook aan de buitenzijde van de bus kan bevinden, bijvoorbeeld bovenop de bus. In Paragraaf 3.1 zijn de veiligheidsaspecten die gepaard gaan met de configuratie van het accupakket besproken.

In de literatuur komt thermal runaway naar voren als het grootste risico bij BEV-bussen (IFV, 2016). Algemene veiligheidsrisico's van een thermal runaway zijn beschreven aan het begin van deze paragraaf. Hieronder volgen nog een aantal technische factoren omtrent veiligheidsaspecten bij accupakketten in bussen.

In Larsson, et al. (2016) wordt een aantal aspecten toegelicht die de veiligheid van elektrische bussen kan vergroten:

- Bepaalde situaties zijn zeer moeilijk volledig te beveiligen, ondanks aanzienlijke inspanningen bij de fabricage, zoals bijvoorbeeld het optreden van interne kortsluiting van cellen (op micrometerschaal). Uit de bron komt naar voren dat er een zeer kleine kans (PPM2-niveau of minder) is op interne kortsluiting in Li-ion-cellen, met als mogelijk gevolg een thermal runaway en een batterijbrand.
- Bij een groot accupakket met veel cellen, zoals vaker het geval is bij elektrische bussen, neemt de kans op een thermal runaway uit een enkele batterijcel toe door het groot aantal cellen. Daarmee nemen ook de potentiële gevolgen bij zo'n groot accupakket toe. Dit kan leiden tot een verhoogd risico op een incident op celniveau. Het is hierbij belangrijk om de gevolgen voor de rest van het accupakket en de elektrische bus tot een minimum te beperken. Dit kan bijvoorbeeld door de kans op het overslaan van thermal runaway tussen cellen te minimaliseren (CE Delft, 2020).
- Een Li-ion-cel bevat onder andere fluor. Fluor kan toxische verbindingen vormen zoals waterstoffluoride (HF). Deze gasemissies zijn nog niet goed bestudeerd en kunnen een risico vormen. Tot dusver hebben zich echter nog geen ongevallen met gasemissies voorgedaan, waaruit kan worden afgeleid dat het risico klein is. Bij een voertuigbrand komen altijd giftige gassen vrij, waardoor incidentbestrijders al anticiperen op giftige gassen met hun uitrusting. Toch is het een veiligheidsstrategie voor de cellen om gassen vrij te laten als de druk in de cel toeneemt om daarmee een mogelijke explosie van de

² PPM = het aantal defecten per 1 miljoen eenheden (Six Sigma Daily, 2020).

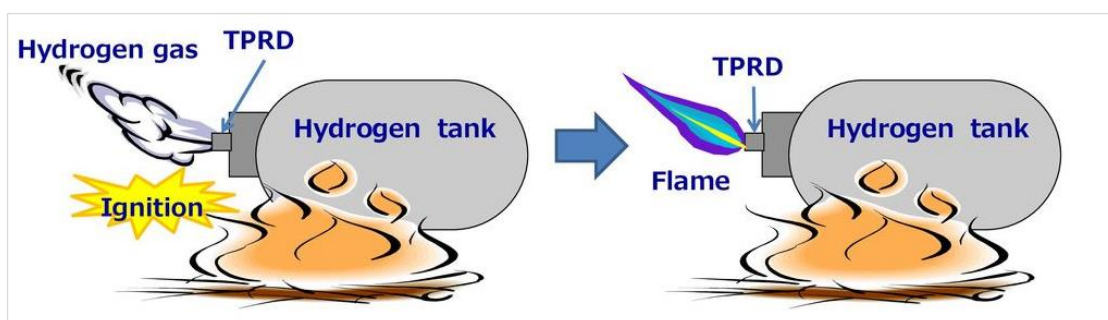
cel te voorkomen. Belangrijk is om te voorkomen dat deze emissies vrijkomen in de ruimte waar de passagiers zich bevinden.

Voor al deze veiligheidsrisico's geldt dat het risico bepaald wordt door de kans dat het optreedt, keer het effect als het optreedt. Het effect kan dus groot zijn, maar het risico kan alsnog klein zijn als de kans dat het optreedt klein is. Dit geldt bijvoorbeeld voor het optreden van interne kortsluiting van de cellen: de kans dat het optreedt is klein, maar het effect als het optreedt kan groot zijn, zeker bij grote accupakketten. Dit is mede afhankelijk van veiligheidsmaatregelen die genomen worden om het overslaan van thermal runaway te beperken.

Veiligheidsaspecten waterstoftank

In waterstofvoertuigen wordt waterstof normaal gesproken opgeslagen als gas onder druk in een waterstoftank. De druk in de tank brengt veiligheidsaspecten met zich mee als gevolg van de eigenschappen van waterstof, deze zijn beschreven in Paragraaf 3.1. Waterstoftanks zijn ontworpen om een maximale druk te weerstaan, deze is vastgelegd in regelgeving (Foorginezhad, et al., 2021). Om ervoor te zorgen dat deze druk niet wordt overschreden, zijn waterstoftanks conform internationale regelgeving uitgerust met een thermally activated pressure release device (TPRD). Dit systeem bestaat uit een smeltzekering en een ventiel en wordt geactiveerd bij een temperatuur van 110 °C waardoor het gas uit de waterstoftank naar buiten kan om de druk in de tank te verlagen, zie Figuur 6 (links). Wanneer de TPRD in werking treedt, zal deze niet meer sluiten en dus alle waterstof afblazen totdat de tank leeg is. De TPRD kan bij een bus dusdanig geplaatst zijn dat het gas naar boven of beneden de bus wordt afgevoerd (AIChE Academy, 2020). Bij de meeste FCEV-bussen (o.a. RET, Qbuzz) is de richting van afblazen recht omhoog (IFV, 2018). Mogelijk wordt het veiligheidsrisico voor omstanders daardoor kleiner omdat het afblazen niet op hen gericht is.

Figuur 6 - Werking van het TPRD (links) en het principe van een fakkel (rechts)



Bron: (Japan Automobile Research Institute, sd).

De grootte van een (ontvlambare) waterstofgaswolk is afhankelijk van de inhoud, de druk en de gatgrootte van de waterstofopslagtank van de bus. Bij bussen is gewoonlijk de inhoud groter dan bij auto's (20 kg i.p.v. 5 kg). Het volume aan gas dat kan ontsnappen uit waterstoftank in bussen is daarom dus aanzienlijk groter dan die van waterstofauto's. Een veiligheidsrisico wordt gedefinieerd als de kans dat het optreedt, vermenigvuldigd met het effect als het optreedt. Waterstoftanks moeten aan strenge veiligheidseisen voldoen waardoor de kans op lekkage, en daarmee het veiligheidsrisico, geminimaliseerd wordt.

Bij het vrijlaten van waterstofgas via de TPRD bestaat de kans dat er een fakkel ontstaat als het gas in aanraking komt met een externe ontstekingsbron, zie Figuur 6 (rechts). Uit IFV (2021a) komt naar voren dat de lengte van de fakkel afhankelijk is van de druk waarmee het gas wordt vrijgelaten en van de grootte van het gat waardoor het gas naar buiten komt. Er is gekeken naar verschillende diameters van de opening van 0,1 tot 20 mm en naar een druk van 8 tot 700 bar. De fakkellengte is het kortst bij een druk van 8 bar en een diameter van 0,1 mm. De fakkellengte is dan 20 cm. Bij een druk van 700 bar (gangbaar voor personenvoertuigen) en diameter van 20 mm is de fakkellengte 50 meter (IFV, 2021a). Doorgaans is de druk in een waterstoftank 350 bar (Foorginezhad, et al., 2021), in dat geval varieert de fakkellengte tussen de 10 en 25 meter (Brandweer Nederland, 2018). De afblaasrichting van de waterstoftank is per voertuigtype (en merk) verschillend.

Om de kans op het optreden van een fakkel te minimaliseren worden de volgende veiligheidsmaatregelen voorgesteld:

- Rekening houden met tankparameters. Het gaat hierbij om: initiële temperatuur en gasdruk, omgevingstemperatuur, de vulsnelheid en de afmetingen van het voertuig (Foorginezhad, et al., 2021). Het TPRD kan zorgen voor het afblazen van druk op het juiste moment.
- Voorkomen dat er in het motorgedeelte van het voertuig een explosieve omgeving ontstaat. Dit wordt gedaan door het monitoren van lekkage van de waterstoftoevoer (Milojević, 2014). Dit kan worden gedaan door het plaatsen van sensoren. De sensoren worden op twee plaatsen in het voertuig geplaatst (Foorginezhad, et al., 2021):
 - in de aandrijving van het voertuig;
 - in het voertuig zelf.
- Ontstekingsbronnen niet in contact laten komen of in de buurt plaatsen van de waterstoftank (Milojević, 2014).

Regelgeving

Waterstoftanks en accupakketten moeten aan strenge eisen voldoen met betrekking tot veiligheid. Hieronder vallen bijvoorbeeld:

- In Global Technical Regulation (GTR) nummer 13 (UNECE, 2013) zijn botsproeven gespecificeerd voor FCEV.
- In Global Technical Regulation (GTR) nummer 20 (UNECE, 2018) zijn botsproeven gespecificeerd voor BEV.
- Er is regelgeving beschikbaar en in ontwikkeling voor de verschillende componenten van waterstofvoertuigen. Het gaat hierbij om regelgeving ten aanzien van het ontwerp, gebruik en onderhoud van de componenten (Bethoux, 2020).
- Bussen dienen te voldoen aan Richtlijn 2007/46/EG – Goedkeuring van motorvoertuigen en aanhangwagens daarvan en van systemen, onderdelen en technische eenheden die voor dergelijke voertuigen zijn bestemd (EUR-Lex, 2019).

3.3.2 Interviews

In meerdere interviews is thermal runaway genoemd als het grootste veiligheidsrisico bij de toepassing van accupakketten. Dit is in lijn met de bevindingen uit de literatuur. Het risico op thermal runaway kan beperkt worden door de kans op het overslaan tussen de cellen te minimaliseren. Hiervoor is het belangrijk om naar de veiligheid over de hele keten te kijken. Hiervoor wordt al een ander onderzoek uitgevoerd waarbij gekeken wordt naar productie-, voertuig- en verkeerregelgeving. Op dit moment zijn zowel de opbouw van de cellen als het plaatsen van afschermen tussen accupakketten nog niet beschreven in regelgeving.

De vervoerders die wij gesproken hebben anticiperen op het vervangen van het accupakket na zeven jaar. Dit is niet vanuit het oogpunt van veiligheid maar vanuit de visie dat de bus dan langer mee gaat.

Bij waterstoftanks is de lekkage van waterstof uit tanks genoemd, indien deze in aanraking komt met een externe ontstekingsbron, als veiligheidsrisico, ook dit sluit aan op de bevindingen uit de literatuur. FCEV-bussen zijn voorzien van sensoren om deze lekkage te detecteren. Om dit risico te ondervangen, wordt bij detectie van waterstofgas direct ontruimd door incidentbestrijders. Meer over incidentbestrijding bij waterstof komt aan bod in de volgende paragrafen.

3.3.3 Conclusies

De veiligheidsrisico's uit de literatuur en interviews zijn eenduidig:

- thermal runaway is het grootste veiligheidsrisico bij het gebruik van accupakketten;
- bij waterstoftanks is het grootste veiligheidsrisico het optreden van een fakkel.

In de literatuur en in de interviews zijn mitigerende maatregelen genoemd om de kans op het optreden van een thermal runaway te verkleinen. Deze zijn vooral theoretisch van aard en vooral gericht op het beperken van overslaan van thermal runaway tussen verschillende cellen. Deze maatregelen gelden niet specifiek voor ZE-bussen, maar voor alle BEV. Dit heeft ermee te maken dat de opbouw van accupakketten in alle BEV in principe hetzelfde is en dat alleen de grootte van de pakketten verschilt. Alle BEV hebben een ingebouwd BMS waarmee veranderingen (bijv. temperatuurwisselingen) in het accupakket gemeten kunnen worden.

Bij waterstoftanks is het optreden van een fakkel het grootste veiligheidsrisico. De ingebouwde TPRD is een veiligheidsmaatregel om niet de maximale druk in de waterstoftank te overschrijden. Een TPRD is thermisch gereguleerd, wat wil zeggen dat waterstof gecontroleerd wordt afgeblazen als de temperatuur rondom de TPRD (als gevolg van een brand) te ver oploopt. Bij de huidige TPRDs is de kritische temperatuur 110°C. Wanneer de TPRD in werking treedt, zal deze niet meer sluiten en dus afblazen totdat de tank leeg is. Verder zijn FCEV-bussen voorzien van sensoren om een eventuele lekkage van waterstof tijdig te detecteren.

3.4 Afwezigheid van geluid

Voertuigen met een elektromotor maken geen tot weinig geluid bij snelheden lager 20 km/u. Voor snelheden vanaf 50 km/u overheerst het bandengeluid. Dit geldt dus voor zowel FCEV- als BEV-bussen, gezien het feit dat in beide soort bussen een elektrische motor wordt gebruikt. Sinds 1 juli 2019 is daarom het *Advanced Vehicle Alerting System* (AVAS) verplicht voor alle nieuwe type elektrische personenauto's en vanaf 1 juli 2021 is dit systeem verplicht voor alle nieuwe elektrische auto's. Dit systeem is ingebouwd in het voertuig en geeft waarschuwingsgeluiden af aan de omgeving. De verwachting is dat dit systeem voor voldoende veiligheid zal zorgen in elektrische personenauto's (CE Delft, 2020).

De verplichting van een AVAS-systeem geldt voor alle elektrische voertuigen en dus ook voor ZE-bussen. De risico's bij bussen zijn anders dan bij een auto vanwege de omgeving van de bus, waarin zich vaak kwetsbare verkeersdeelnemers bevinden. In de rest van de paragraaf presenteren wij onze bevindingen over de veiligheid als gevolg van de afwezigheid van geluid bij ZE-bussen.

3.4.1 Studies en publicaties

Nieuwe ZE-bussen worden uitgerust met het AVAS. Dit systeem is niet verplicht voor bestaande voertuigen. Wereldwijd wordt er een groei van vraag naar AVAS verwacht door de toename van het aantal elektrische voertuigen (The Insight Partners, 2021). Het doel van AVAS is om omstanders te waarschuwen voor een naderend elektrisch voertuig. In CROW (2020b) wordt gesteld dat de effectiviteit van AVAS bij ZE-bussen nog onzeker is omdat er relatief weinig ZE-bussen rondrijden in de wereld. Er zijn ten aanzien van ZE-bussen wel twee punten naar voren gekomen uit de literatuur ten aanzien van AVAS en de afwezigheid van geluid:

- Snelheid waarbij AVAS actief is: AVAS is verplicht tot een snelheid van 20 km/u maar de vervoerder kan ervoor kiezen om AVAS actief te laten zijn tot hogere snelheden.
- Geluiden van AVAS: voor het AVAS kan gekozen worden voor verschillende geluiden. Uit de literatuur komt naar voren dat er discussie is over welke geluiden als prettig ervaren worden.

Hieronder gaan we verder in op deze punten.

Snelheid waarbij AVAS actief is

Er zijn kant en klare AVAS-systemen op de markt, dit is niet veel meer dan een geheugenkaartje met een luidspreker. De speakers worden aan de voorkant van de bus geplaatst en optioneel ook aan de achterkant (Forman Vehicle Services, sd). AVAS is verplicht voor elektrische voertuigen met snelheden tot en met 20 km/u. Vervoerders kunnen ervoor kiezen om waarschuwingsgeluiden af te geven tot een hogere snelheid, zo hanteert bijvoorbeeld RET 32 km/u als grens (CROW, 2020b). De Oogvereniging pleit om AVAS minimaal actief te laten zijn tot en met 30 km/u.

Geluiden van AVAS

Aan de geluiden zelf zijn richtlijnen verbonden en kunnen door de bestuurder zelf worden geselecteerd (CROW, 2020b). Uit de literatuur komt naar voren dat er discussie is over waar de geluiden aan moeten voldoen, dit lijkt afhankelijk te zijn van verschillende doelgroepen. Zo is er in London door 'Transport for London' de voorkeur uitgesproken om bij AVAS in bussen een ander geluid dan een verbrandingsmotor te gebruiken, terwijl de geluiden die getest zijn slecht zijn ontvangen door een testpanel. Ditzelfde testpanel geeft aan dat in ieder geval belangrijk is dat het geluid een indicatie geeft van de snelheid, versnellen en afremmen en de richting (The Guardian, 2019). In Nederland heeft de Oogvereniging³ het verlangen aangeven om het minimale geluidsniveau te verhogen en om een verplicht stationair geluid te laten horen (CROW, 2020b).

3.4.2 Interviews

In de interviews hebben wij getoetst of de afwezigheid van geluid bij ZE-bussen een punt van aandacht is. Uit het interview met de vervoerders is naar voren gekomen dat dit vooral in het begin een aspect is geweest waar bij stil is gestaan. Op de bussen maken de vervoerders gebruik van het geluid van een trambel. Het is voorgekomen dat fietsers daardoor dachten dat er een tram aankwam in plaats van een bus. Echter, de vervoerders geven aan dat het gebruik van AVAS en het geluid van een trambel niet heeft geleid tot rare situaties, maar alleen tot meer comfort.

³ Een belangengroep voor blinden, slechtzienden en oogpatiënten.

In andere interviews is met betrekking tot de afwezigheid van geluid aangegeven dat dit geen punt van zorg is en dat er geen situaties bekend zijn waarin dit tot moeilijkheden heeft geleid. Aanvullend op de literatuur is in het interview met de gemeenten nog genoemd dat de verkeersdeelnemer verandert, denk hierbij bijv. aan het gebruik van oordoppen en koptelefoons (met noise cancelling) door kwetsbare verkeersdeelnemers, zoals fietsers. In de literatuur hebben wij hier geen specifieke informatie over gevonden en ook geen onderbouwing of dit een extra punt van aandacht is.

3.4.3 Conclusies

Over het geheel genomen lijken de veiligheidsrisico's door de afwezigheid van geluid op ZE-bussen beperkt door de verplichting van het AVAS. Zowel in de literatuur als in de interviews wordt de effectiviteit van AVAS niet ter discussie gesteld. Er rijden wereldwijd echter nog relatief weinig ZE-bussen rond waardoor de effectiviteit nog getoetst moet worden. Er zijn twee punten uit het onderzoek die naar voren zijn gekomen in relatie tot AVAS die aandacht behoeven:

- Snelheid waarbij AVAS actief is: AVAS is verplicht tot een snelheid van 20 km/u, maar vervoerders kiezen er soms zelf voor om deze snelheid te verhogen tot 30 km/u. De Oogvereniging pleit naar een standaard verhoging tot 30 km/u. Hierbij is dus een verschil tussen regelgeving en de praktijk.
- Het geluid op de bussen in AVAS: uit de literatuur blijkt dat er discussie is over het type geluid dat de bussen zouden moeten maken. Uit de interviews is naar voren gekomen dat het toepassen van het geluid van een trambel op de bus goed werkt en niet leidt tot vervelende situaties. We hebben geen informatie gevonden over de effectiviteit van verschillende geluiden in diverse omgevingen.

3.5 Brandveiligheid

Alle soorten bussen, en dus ook ZE-bussen, moeten voldoen aan veiligheidsvoorschriften voor brand. In ZE-bussen worden relatief nieuwe systemen toegepast zoals accupakketten bij BEV-bussen en waterstoftanks bij FCEV-bussen. Daarnaast bevatten alle ZE-bussen HV-systemen waardoor er rekening moet worden gehouden met kortsluiting bij het blussen van de bus. In deze paragraaf bespreken we de aspecten die een rol spelen bij de brandveiligheid van ZE-bussen.

3.5.1 Studies en publicaties

Toxische gassen

Bij het optreden van brand komen zowel bij ZE-bussen als bij fossiel-aangedreven ov-bussen, toxische gassen vrij. Veel van deze stoffen komen overeen voor alle soorten bussen (Willstrand, et al., 2020). Het verschil met fossiel-aangedreven bussen, is dat bij het branden van een accupakket er 1,8x zoveel waterstoffluoriden vrijkomen. Deze verhoogde concentratie van waterstoffluoriden kan mogelijk leiden tot huidirritatie. De bestrijding van brand kan veilig plaatsvinden zolang er een goede arbeidshygiëne gehanteerd wordt en de inzet niet langer duurt dan 20 tot 30 minuten in de rook (CE Delft, 2020). Het vrijkomen van toxische gassen is niet uniek voor ZE-bussen, maar geldt voor alle voertuigen waarin accupakketten worden toegepast.

Het RIVM doet onderzoek naar verbeterde detectie van waterstoffluoride wegens het toenomen gebruik van lithium-ion-accu's (RIVM, 2019). Beschermende kleding van de brandweer is tot een beperkte mate bestand tegen waterstoffluoride (HF). HF-absorberende

filters in brandkappen konden niet alle HF-deeltjes tegenhouden, maar de filters hielden de fluorhoudende deeltjes (aerosol) goed vast. Huidbeschadiging kan niet worden uitgesloten, maar systematische gezondheidseffecten als gevolg van huidabsorptie van HF zijn onwaarschijnlijk (Van Veen & Koppen, 2020).

BMS en brandveiligheid

Het BMS dat in accupakketten van elektrische en hybride bussen is geïnstalleerd, is ontworpen om een brand in het bussysteem (casco, elektrische bedrading en/of batterij-aandrijfsysteem) of mogelijke temperatuurveranderingen in het accupakket vroegtijdig te detecteren en te alarmeren zodat de passagiers en de bestuurder de tijd hebben om te evacueren. Echter, het is afhankelijk van de fabricage of er een intern bestrijdingssysteem is die het pakket koelt en een eventuele brand dooft (Forman Vehicle Services, 2020).

Het BMS kan met het koel- en blussysteem communiceren om informatie uit te wisselen en een dreigend incident vroegtijdig op te sporen. Als het BMS in een vroeg stadium verandering in condities van de batterij observeert, kan de batterij in een veilige toestand worden ‘teruggebracht’ zonder dat de brand zich verder ontwikkelt. Uit de tests bleek ook dat zelfs bij een late activering van het blussysteem er een mogelijkheid is om de kritieke toestand van de batterij te vertragen. Dit vergroot de kans op een veilige evacuatie. In het project wordt deze technologie aangevuld met andere veiligheidsmaatregelen, zoals gasdetectie, voor bijvoorbeeld koolmonoxide (EC, 2020).

In het geval van het falen of verhoogde temperatuur van het accupakket zorgt het BMS voor automatische ontkoppeling van de batterij in geval van ongeval of brand. Dit wordt geactiveerd op moment dat een te hoge temperatuur is gedetecteerd (Gehandler, et al., 2017). Bij BEV- en FCEV-bussen zullen enkele belangrijke warmteontstekingsbronnen wegvallen ten opzichte van fossiel-aangedreven bussen, omdat de hete verbrandingsmotor en sommige van hete subsystemen niet nodig zijn (Larsson, et al., 2016).

In een EU-project (LiionFire) hebben onderzoekers een innovatief brandbeveiligingssysteem gebouwd om de risico's in verband met Li-ion-batterijbrand te minimaliseren. Het BMS is ontworpen en aangepast voor specifiek elektrische en hybride-elektrische voertuigen. Het detectiesysteem bestaat hoofdzakelijk uit temperatuursensoren die direct bij de batterijcellen worden geïnstalleerd om vroegtijdig te kunnen waarschuwen in geval van snelle temperatuurstijging. Naast de vroegtijdige brandwaarschuwing zorgt het systeem voor koeling op de plekken waar de temperatuur stijgt boven de kritische norm, om een thermische runaway te voorkomen en te onderdrukken. Dit zal voor vertraging van eventuele incidenten zorgen en daarmee de evacuatie tijd verhogen. Deze technologie zal worden aangevuld met gasdetectie, voor bijvoorbeeld koolmonoxide, om de veiligheid te verhogen (EC, 2020).

Brandbestrijding

Het blussen van een ZE-bus vraagt om een grote hoeveelheid water vanwege het grote accupakket dat in de bus aanwezig is en de ineffectiviteit van koeling. Daarnaast bestaat de kans op het opnieuw ontbranden van het accupakket nadat het geblust is. Bij personenauto's worden de auto's om die reden in dompelcontainers geplaatst waarin de auto onder water wordt gezet (CE Delft, 2020). ZE-bussen kunnen bij brand van het accupakket niet worden ondergedompeld in waterbakken vanwege het formaat van de bus. Aanwezige blusmiddelen op ZE-bussen zijn onvoldoende om een thermal runaway te stoppen, maar enkel om de vlammen van een gewone brand te doven (Gehandler, et al., 2017). Beschikbare



oplossingen zijn lang blussen van de brand of gecontroleerd laten uitbranden. Verder moeten verontreinigde blusmiddelen op de juiste wijze worden verwijderd om geen schade aan het milieu te veroorzaken.

Bij BEV-bussen is de scenariokans op brand lager en de brandontwikkeling langzamer en geringer dan bij dieselbussen (IFV; Van der Staak, 2020).

Alle soorten bussen hebben een visuele aanduiding van het type aandrijving aan de buitenkant van de bus, zo ook ZE-bussen. De aanduiding wordt gemaakt in de vorm van een sticker of markering specifiek voor de aandrijftechniek van de bus. Afhankelijk van het type bus, zijn waterstoftanks en de accu's ingebouwd in het dak van de bus met een druk van maximaal 350 bar, zie Figuur 7. Verschillen tussen brandgevaar met een fossiel-aangedreven bus en een ZE-bus zijn bekend bij de brandweer, hiervoor zijn aandachtscarften ontwikkeld (Brandweer Nederland, 2018; Brandweeracademie, 2020b).

Figuur 7 - Waterstoftanks en de batterijen zitten in het dak van een brandstofcelbus ingebouwd



Bron: (Fuel Cell Electric Buses, 2020).

Binnen het Waterstof Veiligheid Innovatie Programma (WVIP) zijn zeven werkpakketten opgenomen die een veilige introductie van waterstof, als innovatieve en duurzame energiedrager, mogelijk kunnen maken en versnellen (H2Platform, 2021). Eén van deze werkpakketten gaat over risicobeheersing en incidentbestrijding. Binnen dit werkpakket wordt er gekeken naar hoe informatie beschikbaar gesteld kan worden zodat werk aan waterstofinstallaties veilig en adequaat uitgevoerd kan worden. Daarnaast wordt er binnen dit werkpakket gewerkt aan een update van de 'Aandachtscarften waterstof incidentbestrijding' (IFV, 2019b).

Interactie bij brand tussen ZE-bussen

Er zijn geen testen uitgevoerd voor het onderzoeken van interactie van branden tussen verschillende typen ZE-bussen (BEV en FCEV). De veiligheidsmechanismen van de aanwezige systemen zouden los van elkaar moeten zorgen voor de veiligheid en vermijden van ernstige incidenten. Indien er een BEV-bus naast een FCEV-bus in brand staat, zal het TPRD alle waterstof in de tanks moeten laten ontsnappen als de druk in de waterstoftank van de FCEV-bus te hoog wordt door het toenemen van de omgevingstemperatuur. Hierdoor is de kans op een waterstofbrand vermeden.

Een brand kan niet volledig voorkomen worden, aangezien de brandstof/accu een gedeelte is van de brandbare materialen in een (fossiel-aangedreven/ZE) bus. Er zijn incidenten bekend waarin er sprake was van overslaan van brand tussen meerdere ZE-bussen. We hebben voor deze studie een aantal incidenten beschreven waarbij brand is overgeslagen tussen ZE-bussen, zie volgend tekstkader. De incidenten zijn ter illustratie; dit zijn niet alle incidenten waarbij het overslaan van brand een rol heeft gespeeld.

Brand China

In mei 2021 brak er brand uit in een BEV-bus op de universiteit in Guangxi Zhuang. De brand ontstond plotseling in één van de bussen waarna de brand oversloeg naar drie naastgelegen bussen. De vier bussen zijn uiteindelijk uitgebrand, een vijfde werd voorkomen door de brandweer die de branden binnen 20 minuten doofde. Er vielen geen gewonden bij dit incident. [Video: Electric bus bursts into flames, sets nearby vehicles on fire in China](#)

Brand Haarlem

In december 2020 zijn vier nieuwe BEV-bussen in Haarlem volledig uitgebrand. De bussen stonden op het terrein gestald en waren nog niet in gebruik genomen. De apparatuur, beeldschermen, camera's en boordcomputers werden hier ingebouwd. De brand is namelijk ontstaan in één bus en is overgeslagen naar drie andere bussen. In de weken na het incident hebben politie, brandweer, experts en de verzekeringsmaatschappijen van de betreffende vervoerder onderzoek gedaan naar de toedracht van de brand. Uit voorlopig onderzoek (februari 2021) komt naar voren dat de brand niet is ontstaan door brandstichting, en dat de brand op zichzelf staat.

[Miljoenschade door busbrand bij Connexion: "Het waren splinternieuwe bussen"](#)

[Brandstichting uitgesloten bij brand nieuwe elektrische Connexion-bussen](#)

Na het incident werden de BEV-bussen uit voorzorg aan de kant gehouden. De bedoeling was om 20 nieuwe elektrische bussen vanaf 3 januari 2021 in te laten stromen in het rooster. De bussen die in Haarlem staan zijn onderdeel van een grotere bestelling van 111 bussen voor regio Amstelland-Meerlanden, die in de loop van 2021 geleverd worden aan de vervoerder. Op basis van de (voorlopige) uitslag van het onderzoek heeft de vervoerder de bussen weer ingezet in de dienstregeling.

[Nieuwe elektrische bussen Connexion uit voorzorg aan de kant na grote brand in remise](#)

[Brandstichting uitgesloten bij brand nieuwe elektrische bussen Connexion](#)

3.5.2 Interviews

Tot op heden zijn er weinig voorbeelden te vinden van brand met ZE-bussen. De onbekendheid met omgang en verloop van busbranden kan een risico vormen indien een incident plaatsvindt. Een risico kan zijn dat de chauffeur en lokale hulpdiensten niet snel genoeg en adequaat kunnen handelen.

In het algemeen spelen andere aspecten een rol bij de brandveiligheid van ZE-bussen dan bij fossiel-aangedreven ov-bussen. Dit komt overeen met de bevindingen uit de literatuur. Er wordt onderschreven dat het BMS een belangrijke taak heeft in het voorkomen van busbranden. Daarnaast is er een verschil in brandveiligheid van verschillende type accupakketten: er bestaan bijvoorbeeld type accupakketten (LFP) waarbij de kans op een brandincident lager is en de ontbrandingstijd korter is dan bij het gebruik van andere type accupakketten (NMC). Uit ervaringscijfers moet ook blijken of de accu in geval van brand ook tot ontbranding komt of niet, bij personenauto's is dit niet altijd het geval.

Fabrikanten hebben aangegeven dat de brandveiligheidsrisico's lager zijn bij ZE-bussen in vergelijking met fossiel-aangedreven ov-bussen. De reden hiervoor is dat ZE-bussen geen hete componenten in de motor hebben waardoor het risico op brand vanuit de motor relatief klein is.



3.5.3 Conclusies

De brandveiligheidsaspecten verschillen bij ZE-bussen ten opzichte van fossiel-aangedreven bussen:

- Bij BEV-bussen zijn verschillende hulpsystemen en fysieke maatregelen in de bus en het accupakket ingebouwd om risico's op brand en thermal runaway te minimaliseren (zie ook Paragraaf 3.3). Deze maatregelen kunnen busbranden voorkomen of vertragen, waardoor veiligheid van passagiers, bestuurders en omstanders verhoogd wordt. Het BMS wordt in alle nieuwe BEV-bussen toegepast.
- Bij een FCEV-bus uit een brand zich anders dan bij een fossiel-aangedreven ov-bus. Dit heeft effect op omstanders en hulpverleners. Hulpverleners moeten aangepaste uitrusting, blus- en monitoringssystemen hebben in geval van batterij- of waterstofbrand t.o.v. een fossiele brandstofbrand (zie meer in Paragraaf 3.7 over incidentmanagement). Wij hebben geen aanwijzingen gevonden dat er een grote kans is van optreden op een dergelijke brand door de veiligheidsmechanismen, zoals een TPRD, die zijn genomen onder geldende regelgeving.

De brandveiligheid van ZE-bussen hangt daarnaast af van branden die buiten het voertuig ontstaan. Voor het vermijden van een eventuele uitbreiding van een brand wordt gerekend op de individuele veiligheidssystemen in de bussen.

Busfabrikanten geven aan dat ZE-bussen een hoger veiligheidsniveau kennen dan fossiel-aangedreven bussen. Dit heeft te maken met de vele monitoringssystemen en het feit dat het hele systeem van verbrandingsmotor ontbreekt, hetgeen een risico vormt door de combinatie van hoge temperaturen en brandstoffen. We hebben geen literatuur gevonden die dit onderschrijft.

3.6 Veiligheid in besloten ruimtes

Met besloten ruimtes worden bedoeld: wegdelen en plaatsen waar voertuigen aanwezig zijn die gedeeltelijk of geheel afgesloten zijn van de directe buitenlucht. In deze studie maken we bij besloten ruimtes onderscheid tussen:

- (snel)wegtunnels;
- parkeergarages;
- busstations;
- (bus)remises.

De overeenkomst tussen deze ruimtes is dat ze in meer of minder mate overdekt zijn. Daardoor moeten specifieke veiligheidsaspecten en condities in acht genomen worden. Deze aspecten met betrekking tot BEV- en FCEV-bussen zijn hieronder uitgelicht.

3.6.1 Studies en publicaties

Elektrisch-aangedreven voertuigen leveren in tunnels geen extra noemenswaardige risico's op ten opzichte van fossiel-aangedreven voertuigen wat betreft de effecten op de tunnelstructuur. Anderzijds kan evacuatie van passagiers en omstanders moeilijker zijn in geval van lekkage of brand als gevolg van een botsing, met als gevolg een verhoogd risico van blootstelling aan een explosie of een steekvlam. Deze kunnen in sterkte en omvang groter zijn bij bussen dan bij personenauto's (IFV, 2017).



Protocollen bij incidenten

De plaats van de bus en de locatie van de accupakketten en waterstoftanks in de bus is bepalend voor de moeilijkheid van blussen en/of ingrijpen door hulpverleners in besloten ruimtes. Indien de accupakketten onder het voertuig aan de onderkant van het voertuig geplaatst zijn, kan het blussen (in tunnels) moeizamer en langzamer verlopen. Om goed bij het accupakket onder de bus te komen en adequaat te kunnen blussen, zou de bus moeten worden gekanteld door de brandweer. Volgens Tarada (2017) is dit al een uitdaging bij personenauto's, waardoor dit zeer lastig haalbaar is voor bussen, gezien de grootte van het voertuig ten opzichte van de tunnelruimte.

Aangeraden wordt om in de toekomst tunnels van een communicatiesysteem te voorzien zodat het veiligheidssysteem van het voertuig zo snel mogelijk in geval van een incident de tunneloperator wordt gewaarschuwd. Echter afhankelijk van de locatie van het incident, is het raadzaam om met het voertuig de tunnel uit te rijden (indien dicht bij de uitgang), om zo hulpverlening gemakkelijker te maken. In andere gevallen moeten passagiers en omstanders zo snel mogelijk uit de tunnel worden geëvacueerd (Tarada, 2017).

Voor andere besloten ruimtes zoals stallingen, remises en garages zijn er in de literatuur aanvullend adviezen geformuleerd om incidenten te voorkomen zijn. Hierbij gaat het bijvoorbeeld om het continu monitoren van de lucht in de garage, een goed ventilatiesysteem en het vermijden van ontbrandingsbronnen in de besloten ruimte (Milojević, 2014; Waterstofnet, 2021). Bij het toepassen van deze adviezen in een besloten ruimte, wordt de kans op het optreden van een fakkelbrand verkleind.

Ventilatie

Bij een lekkage van waterstof zonder voldoende ventilatie bestaat de mogelijkheid dat er een waterstofwolk kan vormen in een besloten ruimte, wat mogelijk kan leiden tot ontstekingsgevaar (Peutz, 2020).

Om ontstekingsgevaar te voorkomen is het raadzaam om een ventilatiesysteem toe te passen en, indien ventilatie moeilijk toe te passen of te garanderen is, een detectiesysteem te installeren (Waterstofnet, 2021). Dit geldt voor alle typen besloten ruimtes. Voor tunnels geldt dat de vorm van de tunnel een belangrijke bepalende factor is in de mate van ventilatie en daarmee het risico op de ernst van een eventueel incident in tunnels. Bij tunnels met hoge plafonds is er meer luchtdoorstroom en daarom meer ventilatie (Gehandler, et al., 2017). Indien de ventilatie in de tunnel toeneemt, zal de overdruk afnemen (Glover, et al., 2020). Indien de ventilatie in tunnels zo is ingericht dat de luchtstroom met de rijrichting door de tunnel wordt geblazen, zal er een relatief veilige zone zijn in het tunneldeel vóór het brandende voertuig. Dit zal logischerwijs ook het geval zijn in een situatie met een brandincident met een fossiel-aangedreven bus.

In remises gelden de volgende voorzorgsmaatregelen als het gaat om het stallen van FCEV-bussen (Fuel Cell Electric Buses, 2020):

- installatie van sensoren (waterstofdetectiesysteem);
- de aanwezigheid van dakluiken;
- aanwezigheid van goede mechanische afzuiging, zodat eventueel ontsnapte waterstof afgevoerd kan worden;
- ter plaatse hebben van een waterstofafblaasinstallatie te hebben in de werkplaats.

Verder is de literatuur schaars over veiligheidsaspecten die specifiek gelden in remises met betrekking tot de veiligheid van het stallen van BEV- en FCEV-bussen.



Alleen als de ventilatierichting tegengesteld is aan de uitstroomrichting van een eventueel gaslek, kan lokaal ophoping ontstaan. Ventilatie (luchtaanvoer) versterkt ook de verbranding van waterstof en dat kan tot overdrukken leiden. Als de waterstofuitstroom groot is, bijvoorbeeld bij het openen van de TPRD, kan ventilatie onvoldoende zijn om de waterstofconcentratie laag te houden. Dit zou een (groot) risico kunnen opleveren indien de concentratie te hoog wordt binnen een bepaalde ruimte of als er ontstekingsbronnen aanwezig zijn (IFV, 2021c).

Praktijktesten en simulaties

We hebben in de literatuur diverse praktijktesten en simulaties gevonden met betrekking tot incidenten in besloten ruimtes:

- Bij een kwantitatieve risicoanalyse (QRA) van het ingenieurs adviesbureau Peutz voor de gemeente Arnhem zijn verschillende gradaties van risico naar voren gekomen bij het laten halteren van FCEV-bussen onder een overdekt busstation. Hierbij is de kans op explosie als gevolg van de eventuele vorming van een waterstofwolk als gevaarscenario gedefinieerd en geëvalueerd. De factoren die het risiconiveau bepalen zijn de kans op het ontsnappen van waterstof uit tanks (falen van overdrukventiel), de totale duur van haltering en bufferen van de bussen⁴ en het totaal aantal aanwezigen in en om het busstation. Het risico kan met beperkte haltering en buffertijden per dag worden beperkt tot acceptabel niveau (Peutz, 2020). De interactie met de omgeving is niet te kwantificeren zonder tests die hierop uitgevoerd zouden kunnen worden.
- In een studie van TNO (2020) naar personenauto's in parkeergarages wordt aanbevolen om rekening te houden met de overslag van brand naar meerdere auto's. Middels een risicoanalyse kan worden nagegaan in hoeverre de risico's voor BEV- en FCEV-auto's acceptabel zijn, en nagegaan dient te worden of op termijn de kans op brand toeneemt door een toename van het aantal ZE-auto's. De kans en mogelijke schade op explosie dienen dan ook meegenomen te worden. Aanbevolen wordt om aan te sluiten bij de nieuwe ISO-norm die momenteel wordt opgesteld door ISO TC 98/SC3 over krachten op constructies (ISO, 2021). De nieuwe inzichten kunnen vervolgens worden meegenomen in de toekomstige ontwikkeling van regelgeving en normen voor zowel nieuwbouw als bestaande bouw (TNO, 2020).
- Het SWOV heeft praktijktesten uitgevoerd met FCEV-bussen in tunnels met een waterstofaanhanger. De bevindingen zijn als volgt: Vanuit de chauffeursinstructie zou er bij een waarschuwing melding doorgereden mogen worden totdat zich een veilige plek aandient om te stoppen. Volgens RWS-richtlijnen mag de chauffeur de Heinenoord-tunnel echter niet inrijden bij storingssignalering van de bus. In de documentatie staat niet aangegeven hoe snel een waarschuwing melding kan escaleren tot een error-melding. Door de conflicterende instructies bestaat het risico dat er bij een waarschuwing melding doorgereden wordt, waardoor de chauffeur, de passagiers en medeweggebruikers aan potentieel gevaar worden blootgesteld (SWOV, 2020).
- In IFV (2017) wordt geadviseerd om een voorziening aan de bus te bevestigen waardoor deze bij incidenten uit de tunnel gesleept kan worden (bijv. één of meerdere trekogen).
- De tunnelveiligheid wordt bepaald door het ontwerp van de tunnel, de voertuigen, het gebruik en gedrag van personen in de voertuigen en hulpverleningsmogelijkheden. De veiligheid in tunnels lijkt voor nu voldoende gegarandeerd te zijn voor elektrische bussen. Opleiding, training en oefening van de buschauffeur en hulpdiensten kunnen bijdragen aan een verhoogde veiligheid van elektrische bussen in tunnels (IFV, 2017).

⁴ Bufferen is het wachten of inactief zijn van bussen tussen het einde van een rit en het begin van de volgende rit in de dienstregeling. Dit kan enkele minuten tot uren zijn, afhankelijk van de frequentie van de buslijn.



In het volgende tekstkader staat een beschrijving van brand in een loods met van Arriva.

Brand in loods Arriva in Doetinchem

In oktober 2021 is er in een loods van Arriva een FCEV-bus en een dieselbus uitgebrand. We weten niet of de waterstoftank op dat moment gevuld was. De FCEV-bus was die betreffende week net aangekomen bij de vervoerder. De brand werd in ongeveer 4 uur grotendeels geblust door de brandweer, waarna het nablussen kon beginnen. Tot dat punt werd de brand bestreden van buiten de loods waar de bus stond, wegens gevaarstelling, het nablussen geschiedde in de loods. De FCEV-bus was onderdeel van een pakket van 10 FCEV-bussen die in de Achterhoek zouden gaan rijden. De oorzaak van de brand wordt ten tijde van schrijven van dit rapport onderzocht. [Gloednieuwe waterstofbus gaat verloren bij brand in Arriva-loods: 'Ik zag vuur en hoorde knallen'](#)

Regelgeving

De huidige regulering is niet altijd even duidelijk over het omgaan met voertuigen op alternatieve brandstoffen in parkeergarages en onderbouw van gebouwen (Gehandler, et al., 2017). Er worden geen aanvullende vereisten gesteld aan ventilatie- en sprinklerinstallaties in Europa (Peutz, 2020). Bij parkeergarages onder hoge gebouwen waarin wordt geslapen wordt bij nieuwbouw een automatische blusinstallatie verplicht. Het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (BZK) neemt de verplichting vanaf 2022 op in het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl) (IFV, 2021b).

PGS26, de richtlijn voor het bedrijfsmatig stallen, onderhouden en repareren van motorvoertuigen, wordt uitgebreid naar waterstofvoertuigen. Daarnaast werkt NEN in opdracht van het ministerie van BZK aan een nieuwe NEN-norm voor brandveiligheid van parkeergarages, rekening houdend met alternatieve energiebronnen in voertuigen (H2Platform, 2020b). De regulering gaat uit van een brandcompartiment van maximaal 1.000 m². Dit is niet altijd toereikend aangezien parkeergarages, remises en onderhoudscentra groter kunnen zijn dan 1.000 m². Boven de 1.000 m² zou daarom een doelgerichte aanpak ingesteld moeten worden.

3.6.2 Interviews

Veiligheidsrisico's van BEV-bussen in tunnels zijn niet zozeer groter dan bij fossiel-aangedreven bussen, maar wel anders. Er zijn aanvullende veiligheidseisen voor werkplaatsen en remises als het om BEV-bussen gaat. In een aantal VRs wordt compartimentering van de remises geëist, terwijl dit in andere VRs niet het geval is. Er is dus geen eenduidige richtlijn, waardoor dit een punt van aandacht is.

Bij FCEV-bussen moeten werkplaatsen en remises speciaal ingericht worden als vonkvrije ruimte. Ventilatie is belangrijk en de mogelijkheid om het dak te kunnen openen wordt aanbevolen. Daarnaast zijn sensoren essentieel voor het monitoren van de waterstofconcentratie in de lucht.

In sommige gevallen worden voor het in gebruik nemen van ZE-bussen op (bestaande) routes specifiek de besloten ruimtes met de betrokken partijen bekeken, getest en de eventuele risico's ingeschat. Dit heeft op enkele locaties gezorgd voor zeer precieze eisen bij de besloten ruimtes waar ZE-bussen worden ingezet. Deze eisen zijn alleen specifiek voor de locaties waarvoor dit is afgesproken met bijvoorbeeld provincies, gemeenten, veiligheidsregio's en de vervoerder(s). Voorbeelden hiervan zijn het toestaan van halteren met FCEV-bussen op het busstation van Arnhem en Den Haag (centraal), het doorrijden van tunnels in Rotterdam, en BEV-bussen door de bus tunnel onder Schiphol.

Specifiek voor tunnels geldt dat de risico's van ZE-bussen per geval in kaart worden gebracht door tunnelbeheerders. Het komt voor dat sommige risico informatie ontbreekt, waardoor een kwantitatieve risicoanalyse moeilijk te maken is. Dit zorgt ervoor dat er soms conservatieve waarden gehanteerd worden voor de toelating van ZE-bussen in tunnels.

Brandincidenten met BEV-bussen in tunnels zijn lastig te bestrijden vanwege het lang branden van batterijpakketten, de toxiciteit en het explosiegevaar. Ook een brand in een tunnel met een FCEV-bussen kan lastig en een risico zijn, gezien het feit dat een waterstofwolk zou kunnen worden gevormd waardoor er risico op een fakkelbrand kan ontstaan. Dit is afhankelijk van het ventilatiesysteem en de richting ten opzichte van de stroming van een gaslek.

De procedures voor vergunningverlening van tunneldoorgang door ZE-bussen kunnen soms veeleisend zijn. In de interviews is aangegeven dat er goed overleg en een goede samenwerking is met partijen die hierbij betrokken zijn.

3.6.3 Conclusies

De aard van eventuele incidenten kan voor lastige situaties zorgen in besloten ruimtes. De incidentbestrijding van ZE-bussen brengt andere uitdagingen met zich mee dan bij fossiel-aangedreven bussen (zie Paragraaf 3.7). Dit is nog lastiger in een besloten ruimte dan in de open lucht.

Specifiek voor besloten ruimtes zijn de belangrijkste veiligheidsaspecten:

- Het ophopen van een waterstofwolk bij FCEV in besloten ruimtes: om het veiligheidsrisico te beperken, is de toepassing van ventilatie en sensoren essentieel.
- Aanvullend wordt er voor BEV-bussen in een aantal VRs compartimentering geëist in besloten ruimtes zoals remises.
- Huidige regelgeving is nog niet volledig als het gaat om het minimaliseren van veiligheidsrisico's bij plaatsing of gebruik van ZE-bussen in besloten ruimtes. Regelgeving wordt wel uitgebreid, zo worden eisen voor het veilig stallen, onderhouden en repareren van FCEV-voertuigen in besloten ruimtes opgenomen in PGS26.

ZE-bussen moeten voldoen aan veiligheidseisen die komen kijken bij componenten- en typegoedkeuring. Het komt echter voor dat tunnelbeheerders de doorgang met FCEV-bussen door tunnels uit voorzorg verbieden, of toestaan na uitgebreide veiligheidstesten van het voertuig en inschatting van risico's bij verschillende scenario's van eventuele incidenten in tunnels.

3.7 Incidentmanagement

Het gebruik en de toepassing van alternatieve vormen van energiedragers voor bussen brengt een andere aard van incidenten met zich mee. In deze paragraaf beschrijven we op welke wijze het incidentmanagement is ingericht bij incidenten met ZE-bussen.

3.7.1 Studies en publicaties

Het doel van gedegen incidentmanagement voor ov-bussen is om de veiligheid van reizigers en omstanders te waarborgen bij een calamiteit, zonder daarbij de hulpverleners in gevaar te brengen. Incidenten met ZE-bussen vragen extra aandacht en bekwaamheid van de hulpdiensten omdat er bij een incident andere stoffen kunnen vrijkomen (Paragraaf 3.5) en de onderdelen in de bus verschillen van fossiel-aangedreven bussen (Paragraaf 3.1). Bij een incident moet rekening gehouden met deze verschillen. Het feit dat de bussen door een

ander soort systeem en energiebronnen worden aangedreven brengt nieuwe situaties met zich mee.

Omgang met incidenten bij BEV-bussen heeft in de grote lijnen dezelfde karakteristieken als bij elektrische auto's (CE Delft, 2020; Brandweeracademie, 2020b);

- Ruime afstand houden.
- Het systeem uitschakelen.
- Veel water gebruiken.
- Controleren van de brand vanwege de lange tijd dat doorbranden (van het accupakket) mogelijk is.
- Rekening houden met een thermal runaway.
- Zo goed als mogelijk proberen het vuur te controleren.
- Elektrisch-aangedreven voertuigen niet worden weggesleept met de wielen rollend omdat, bij rollen, extra energie in de accu zal worden opgeslagen. Daardoor kan de elektronica en/of de accu beschadigd raken.
- Ook de handelingen van identificatie van de situatie en type voertuig, spanning van het voertuig verwijderen en het gebruik van speciale tools om elektrische voertuigen te identificeren zijn overeenkomsten.

Daarnaast zijn er natuurlijk verschillen waar rekening mee moet worden gehouden bij het incidentmanagement:

- Het accupakket in bussen is groter waardoor er meer energie aanwezig kan zijn in het accupakket.
- Personenauto's worden bij (kans op) een thermal runaway in een dompelbak en/of salvagecontainer geplaatst. Dit is voor ov-bussen niet mogelijk vanwege de voertuig-grootte.

Omgang met incidenten bij FCEV-bussen wordt beschreven in de aandachtkaart van de Brandweer als volgt (Brandweer Nederland, 2018):

- Houd rekening met de veiligheidsafstanden. Benader het voertuig vanaf de voorzijde, onder een hoek van 45 graden.
- Benader het voertuig nooit vanaf de achterzijde in een zone van 25 meter.
- Houd minimaal 25 meter afstand i.v.m. kans op ontstaan fakkelflam en zeer hard geluid (>140 dB).
- De fakkelflam van de waterstofbrand niet blussen, uitbreiding voorkomen door koelen omgeving. Altijd in de richting van de fakkelflam meekoelen.
- Controleer met een warmtebeeldcamera de lengte van de vlam (een deel is onzichtbaar) en de omgeving.
- Benader het voertuig altijd onder dekking van een straal en blus de voertuigbrand zo snel mogelijk met zoveel mogelijk water af.

Richtlijnen en factoren voor incidentmanagement

IFV & Van der Staak (2020) hebben een analyse gedaan naar het incidentmanagement bij BEV-bussen. Hierin komt naar voren dat de brandweer en de busvervoeronderneming een gericht inzetprotocol moeten hebben waarin vereisten staan beschreven ten aanzien van incidentbestrijding. Dit zijn onder andere:

- Een coördinatie van de calamiteitenprotocollen met betrokken partijen zoals gemeente, vervoerder, NS, en ProRail (indien in nabijheid van spoorwegen/stations).
- Actuele bereikbaarheidskaarten en aanvalsplannen: er zijn handelingsactiekaarten voor incidenten met elektrische- en FCEV-bussen opgesteld door de brandweer (Brandweer Nederland, 2018). Bij hulpdiensten moet in de opleiding prioriteit worden gegeven aan

omgang met waterstofbrand en incidenten, om ervoor te zorgen dat het personeel begrijpt hoe het naar behoren moet reageren op waterstofincidenten (H2 safety panel, 2015). Het is onbekend in hoeverre deze kennis is opgenomen in trainingen van de veiligheidsregio's.

- Kennis en ervaring up-to-date over incidentbestrijding elektrische bussen en laadprocessen

De te nemen maatregelen door de vervoerder voor het reduceren van risico's bij calamiteiten zijn: het activeren van een noodknop door de buschauffeur (of verkeersleiding van de vervoerder), evacueren van buspassagiers, alarmering van de vervoerders' verkeersleiding door de chauffeur. Vervolgens moet de verkeersleiding het veiligheidsprotocol van toepassing in werking stellen, waarna partijen in de nabije omgeving van de calamiteit worden geïnformeerd door het busvervoerbedrijf. Indien het om een incident met laden gaat, moet ervoor worden gezorgd dat de pantograaf of stekker ingetrokken of afgekoppeld wordt door het busvervoerbedrijf. Hierbij is het wenselijk dat er een bedrijfsdeskundige ter plaatse wordt gestuurd (IFV; Van der Staak, 2020).

Bij FCEV-bussen zijn er andere handelwijzen die de hulpdiensten moeten volgen voor gedegen incidentmanagement. Dit staat o.a. beschreven op de waterstofkaart van de Brandweer en in een webinar instructievideo⁵ van de brandweer (Brandweer Nederland, 2018). Hierin is de voornaamste boodschap dat er bepaalde veiligheidsmechanismen zijn in de systemen die kunnen worden uitgezet. Hoe te ageren in geval van het slechtste scenario (hele bus in staat van ontbranding) waar veilige benadering van het voertuig niet mogelijk is, wordt niet besproken. Hierin blijft dus een kennishiaat achter.

Protocollen voor incidenten ZE-bussen

De meest voorkomende onderdelen van het inzetprotocol van incidentmanagement van BEV-bussen zijn in deze paragraaf beschreven zoals in IFV & Van der Staak (2020).

Voor de brandweer zijn de volgende handelsperspectieven van toepassing:

- Het dragen van persoonlijke beschermingsmiddelen.
- Controleren status voertuig: ladend met pantograaf of stekker, of in een andere positie die om extra aandacht vraagt (in tunnels, bepaalde wegdelen, dicht bij gebouwen of andere (hoogspanning) infrastructuur:
 - Als de pantograaf is ingetrokken kan de brand worden bestreden als een gewone busbrand, met afstemming van de bedrijfsdeskundige over spanning op de bus (onderdelen).
 - Indien de pantograaf in contact is met de laadvoorziening, moet deze worden afgekoppeld. Dit in afstemming met bedrijfsdeskundige over spanning op de bus (onderdelen).
 - Juiste informatie en overdracht aan berger verstrekken bij de afwezigheid van kans op een 'thermal runaway'.
 - Bij kans op thermal runaway handelen zoals in voorschriften staat beschreven, zie ook Paragraaf 3.5 over brandveiligheid.

⁵ [Webinar 6 Incidentbestrijding waterstof en waterstofbussen - YouTube](#)



De volgende elementen voor adequaat functionerend calamiteitenbestrijdingsprotocol bij verschillende partijen zijn (IFV; Van der Staak, 2020):

- Voor busfabrikanten: Deel de inzichten uit de risicoanalyses tussen busproducenten.
- Voor concessieverleners: Zorg dat veiligheidsregio's worden geïnformeerd door de initiatiefnemer (vervoerder) over de ideeën van plaatsing van laadvoorziening en/of tankinfrastructuur voor elektrische en FCEV-bussen in de publieke ruimte.
- Voor concessiehouders/vervoerders:
 - Zorg dat de veiligheidsrisico's van de eigen bedrijfsvoering systematisch worden beheerst door een veiligheidsmanagementsysteem.
 - Werk de beheersing van de veiligheidsrisico's uit in een veiligheidsplan waarvan het, met de veiligheidsregio afgestemde, calamiteitenbestrijdingsplan een onderdeel is, net zoals onder meer de veiligheidsorganisatie, opleidingsplannen en onderhoudsregime van het materieel.
- Voor verkeersmanagers (RDW/lokaal):
 - Er is nog geen standaard testprotocol voor het snelladen van bussen.

Praktische ervaringen met ZE-bus-incidenten

Om tegemoet te komen aan de wens om te kunnen leren van incidenten, heeft IFV een database met bijbehorend [dashboard](#) ingericht met daarin informatie over incidenten. De eerste halfjaarrapportage van incidenten met alternatief-aangedreven voertuigen is recent verschenen (IFV, 2021d). In de rapportage wordt vooral ingegaan op de data voor de landelijke database verzameld wordt en op de dataset. Er kunnen nog geen verstrekkende conclusies worden getrokken.

Een voorbeeld van een incident met een FCEV-bus in Groningen staat in volgend tekstkader beschreven.

FCEV-bus Groningen

In augustus 2021 diende de brandweer in actie te komen vanwege een FCEV-bus die op de bufferplaats stond bij het Hoofdstation. Vanwege een luide pieptoon uit de bus werden de hulpdiensten gealarmeerd. Volgens het protocol van de vervoerder werd direct de brandweer gewaarschuwd. Uiteindelijk is de incidentbestrijding beperkt gebleven bij het uitvoeren van enkele technische controles.

www.oogtv.nl/2021/08Brandweer doet onderzoek bij FCEV-bus nabij hoofdstation

3.7.2 Interviews

In het interview met incidentmanagers kwam duidelijk naar voren dat de handelwijze voor het incidentmanagement voor ZE-bussen op dit moment niet geheel duidelijk is. Dit heeft meerdere oorzaken:

- De omgeving van een ZE-bus is complex: de bus vervoert passagiers en kan zich in een besloten ruimte bevinden (remise, tunnel, busstation) waarbij omstanders en andere bussen of voertuigen aanwezig kunnen zijn. Daarnaast zijn er knooppunten waar verschillende vervoerders actief zijn, waardoor meerdere partijen betrokken kunnen zijn bij het incident. Specifiek voor ZE-bussen kunnen er verschillende laadsystemen aanwezig zijn en met de komst van ZE-bussen zijn er meerdere type aandrijvingen bijgekomen die vragen om ander incidentmanagement.
- Wanneer een incident met een ZE-bus plaatsvindt duurt incidentbestrijding langer dan in het geval van een incident met een fossiel-aangedreven bus. Dat betekent dat afzettingen van rijstroken langere tijd noodzakelijk zijn en dat de dientengevolge



ontstane files ook langer zijn (zowel in lengte als in tijd). Hoe langer een file bestaat, hoe langer een filestaart blijft bestaan. Juist filestaarten verhogen de kans op (ernstige) vervolgincidenten aanzienlijk. Als gevolg van de langere duur van incidenten neemt de kans op kijkersfiles en daaraan relateerbare ongevallen ook toe. Dit geldt zowel in het geval van pechbestrijding als ongevals- of brandbestrijding.

- Bussen zijn dermate groot dat deze niet in een dompel- of salvagecontainer geplaatst kunnen worden (zie ook Paragraaf 3.5) na het optreden van een brand. Op dit moment zijn er geen andere oplossingen beschikbaar anders dan het ter plaatse blussen van de brand of het gecontroleerd laten uitbranden van de bus. Voor het blussen is veel water nodig vanwege de grote accupakketten die in bussen worden toegepast. Rijkswaterstaat beschikt als enige in Nederland over een lekbak. In deze lekbak kan een ZE-bus geplaatst worden die in brand heeft gestaan. Deze lekbak was oorspronkelijk bedoeld voor incidenten met lekkende tankwagens of containers en kan ook gebruikt worden voor ZE-bussen.
- Bergers geven aan dat het bergen van ZE-bussen in de praktijk voorkomt na bijvoorbeeld het stilvallen van een bus. Het stappenplan hiervoor is in principe:
 - stroom eraf door de sleutel uit de bus te halen;
 - steekassen demonteren;
 - alles goed in lepels vastzetten en wegslepen.Het verschilt per merk c.q. type bus omdat er ook bussen zijn waarvan de steekassen niet gedemonteerd worden. Over het bergen van ZE-bussen na brand bestaan nog onduidelijkheden.
- Op de Veluwe rijden ZE-bussen rond die bij de achteras moeten worden opgetild en daarna kunnen worden weggesleept. Indien dit niet mogelijk is, dan mogen de bussen bij de vooras opgetild worden om te slepen, maar mag er niet harder mee worden gereden dan 25 km/u.

Het is voor sommige typen FCEV-bussen niet toegestaan om door een aantal (vaak langere) tunnels te rijden. De oorzaak hiervan is dat er bij concessiehouders en fabrikanten onbekendheid kan zijn in de omgang met incidentenbestrijding. Met betrekking tot informatievoorziening zijn de volgende punten naar voren gekomen uit de interviews:

- ZE-bussen hebben een ingebouwd systeem om de verkeerscentrale van de vervoerder op te roepen in geval van een (aankomend) incident. Dit versnelt het proces en de informatieverspreiding onder de betrokken partijen in zulke gevallen.
- De hulpdiensten hebben toegang tot een database waarin de systemen staan getekend op een tekening van de bus, waar kritieke onderdelen zitten en hoe noodsystemen werken. Dit kan worden opgevraagd door het kenteken van de bus in te voeren.

Meerdere partijen hebben aangegeven dat er behoefte is om te leren van incidenten. Lokaal (bij VRs) worden incidenten bijgehouden en wordt van de ervaringen geleerd met betrekking tot het incidentmanagement. Echter, in ons onderzoek hebben we geprobeerd een overzicht te maken van incidenten met ZE-bussen. We hebben daarbij proberen te achterhalen wat de oorzaak is geweest van incidenten en welke bijzonderheden er speelden bij de incidenten op basis van literatuur en gesprekken. Het maken van een dergelijk overzicht bleek in de praktijk lastig. Dit heeft er waarschijnlijk mee te maken dat de onderzoekstrajecten lang duren en informatie niet makkelijk gedeeld wordt doordat er veel partijen bij betrokken zijn (onder andere incidentmanagers en verzekeraars). Dit is tegenstrijdig met de wens om juist kennis en ervaringen te delen.

3.7.3 Conclusies

ZE-bussen vragen specifieke handelingen op het gebied van incidentmanagement. Veel aspecten hierin zijn vergelijkbaar met het bestrijden van een incident bij elektrische auto's, maar verschillend van het incident bestrijden bij fossiel-aangedreven bussen. Een groot verschil is dat er geen dompelcontainer kan worden ingezet bij een lange batterijbrand of thermal runaway. Hulpdiensten zijn dus aangewezen op gecontroleerd laten uitbranden of blussen. Bergers geven aan dat het bergen van ZE-bussen in de praktijk gebeurt na bijvoorbeeld het stilvallen van een bus, maar dat er onduidelijkheden bestaan over het bergen van ZE-bussen na brand.

Uit interviews en verslagleggingen blijkt dat er verschillen in handelwijzen tussen veiligheidsregio's zijn bij vergelijkbare incidenten. Brandweer Nederland is bekend met specifieke handelwijzen bij BEV- en FCEV-bussen. Echter is de kennis in praktijk nog niet overal aanwezig in de veiligheidsregio's. Veel aspecten voor gedegen incidentmanagement zit in de kennisdeling en informatievoorziening tussen partijen bij de ingebruikname van de nieuwe voertuigen.

3.8 Onderhoud en veiligheid

Hoewel er grote delen van ZE-bussen vergelijkbaar zijn met fossiel-aangedreven bussen, behoeft onderhoud aan de aandrijflijn en controlesystemen een andere aanpak. Bussen met een brandstofcel- of batterijelektrische aandrijving stellen andere eisen aan garagepersoneel, monteurs en technici dan bij het werken aan en met fossiel-aangedreven dieselmotoren. Elektromotoren en een brandstofcellen hebben minder bewegende onderdelen en hebben daardoor minder onderhoud nodig dan een fossiel-aangedreven ov-bus. Daarnaast hebben brandstofceltanks en accupakketten een ander onderhoudsinterval en andere aanpak nodig dan fossiele brandstofmotoren.

3.8.1 Studies en publicaties

Onderhoud aan zero-emissie-bussen (algemeen)

We hebben in de literatuur de volgende verschillen gevonden tussen onderhoud aan fossiel-aangedreven bussen en onderhoud aan ZE-bussen (AMT, 2019a):

- mechanische reparaties zijn minder frequent doordat er minder draaiende onderdelen zijn in de aandrijving, en remblokken gaan langer mee doordat bussen regeneratief remmen;
- onderhoud aan ZE-bussen is schoner, doordat er minder vloeistoffen aanwezig zijn dan in fossiel-aangedreven bussen.

Digitale checklists en diagnosesystemen komen vaker aan de pas bij ZE-bussen dan bij fossiel-aangedreven bussen

Het onderhoud aan ZE-bussen kan door de vervoerder uitbesteed worden aan de fabrikant. Hiermee draagt de fabrikant de verantwoordelijkheid van het onderhoud. Andere opties zijn gedeeltelijke verantwoordelijkheid (op bepaalde onderdelen) tussen vervoerder en fabrikant, of het onderhoud wordt volledig gedaan door de vervoerder binnenshuis. Onderhoudsservice of pechhulp kan onderdeel zijn van het servicecontract wat de vervoerder afsluit met de fabrikant. Een andere optie is dat onderhoud gedaan wordt door een servicepartner, aangesloten of in samenwerking met de betreffende fabrikant (AMT, 2019a).

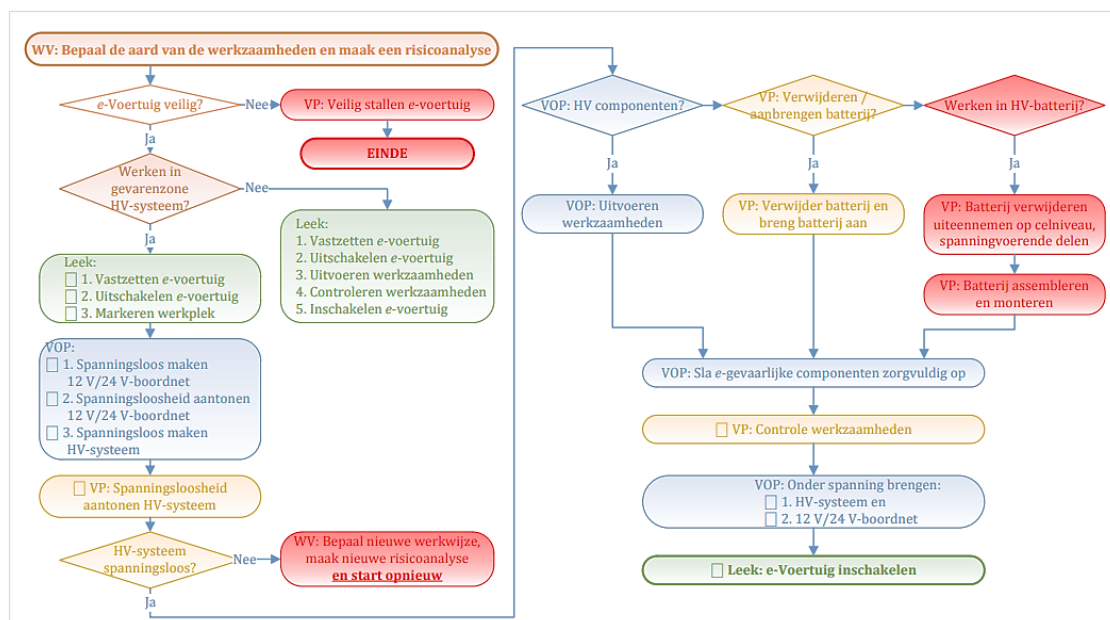


Onderhoud aan elektrische installaties boven de 24 volt dienen te voldoen aan NEN 3140. Deze norm geldt sectorbreed en dient door alle partijen gehanteerd te worden. Gereedschap en beschermingsmiddelen om aan ZE-voertuigen te werken zijn voorgeschreven in de NEN 9140-norm. Gereedschappen, diagnoseapparatuur en -software worden vanuit de fabrikant geleverd om onderhoud uit te voeren. Voordat er aan een ZE-bus gewerkt mag worden, dient de bus volledig spanningsvrij te zijn. Alleen opgeleid en gecertificeerd personeel mag werken aan de hoog voltage(HV)-installatie. Installaties en materiaal voor het werken op hoogte, zoals bij het werken aan pantografen, batterijen of tanks op het dak, dienen aan de benodigde veiligheidseisen te voldoen (AMT, 2019a).

Onderhoudstechnici en bergers kunnen opleidingen volgen om NEN-certificaten te halen. Deze certificaten zijn vereist om een medewerker aan een ZE-voertuig te mogen laten werken. Onderdeel van NEN-trainingen zijn gevaarmitigatie, zoals het werken met hoog voltagesystemen. Dit komt bovenop diploma's (EBAT/BAT) die technici al hebben. Vervoerders en fabrikanten kunnen daarnaast interne opleidingsprogramma's opzetten om te werken aan ZE-voertuigen (AMT, 2019a).

Binnen de NEN 9140 wordt er, voordat er werkzaamheden aan een elektrisch voertuig uitgevoerd worden, een risicoanalyse gemaakt. Binnen deze analyse wordt er gekeken wie en met welke certificering aan een voertuig mag werken en welk gereedschap daarvoor nodig is. Elk onderhoudsbedrijf dat onderhoud uitvoert aan elektrische voertuigen dient te beschikken over een EV-Eindverantwoordelijke Persoon, ofwel werkverantwoordelijke persoon (EV-WV). Daarnaast is er een EV-Vakbekwaam Persoon (EV-VP) die aan de HV-installatie mag werken. Verder kent de norm ook een Voldoende Opgeleid Persoon (EV-VOP) en een niet-EV-opgeleid persoon (een leek) (AMT, 2019b; CE Delft, 2020). Figuur 8 laat een flowchart zien hoe er binnen de NEN 9140 gewerkt kan worden.

Figuur 8 - Flowchart inventariseren van de werkzaamheden en bepalen risico's, om vervolgens de juiste gecertificeerde persoon in te schakelen



Bron: (AMT, 2019b).



Werken aan brandstofcel FCEV-bussen (specifiek)

Het overdekt stallen dan wel het onderhouden van FCEV-bussen in een werkplaats vraagt een aantal aanpassingen, zoals besproken in Paragraaf 3.6 – Veiligheid in besloten ruimtes. Daarnaast moeten er afspraken gemaakt worden met de lokale en regionale veiligheidsautoriteiten, zoals brandweer en veiligheidsregio.

Waterstof wordt toegevoegd aan PGS26⁶, een richtlijn die betrekking heeft op het stallen, onderhouden en repareren van motorvoertuigen (H2Platform, 2020b). In de PGS-richtlijn staan de belangrijkste risico's beschreven van activiteiten voor de veiligheid en gezondheid van werknemers, veiligheid van de omgeving en de brandveiligheid. Ook staan in een PGS-richtlijn de mogelijke gevolgen van die risico's voor het bestrijden van een incident. De richtlijn geeft invulling aan omgevingsveiligheid, arbeidsveiligheid, brandbestrijding en incidentbestrijding (PGS, 2021).

Verder zijn er nog specifieke veiligheidsaspecten die meegenomen dienen te worden bij het onderhoud aan FCEV-bussen:

- mobiele waterstofsensoren zijn nodig voor het tijdig melden van eventuele lekkage van waterstof (FCH 2 JU, 2019);
- een aardekabel zorgt ervoor dat de kans van eventuele statische vonken geminimaliseerd wordt (FCH 2 JU, 2019);
- de oppervlaktetemperatuur van gereedschap en apparatuur dient gelimiteerd te zijn tot 400°C (Milojević, 2014), zodat eventueel gelekte waterstof niet kan ontbranden.

Werken aan BEV-bussen (specifiek)

Het onderhoud en het werken aan de elektrische installatie valt onder de algemene normen NEN 3140 en NEN 9140. Onderhoud aan pantografen volgen dezelfde normen.

Accupakketten zijn over het algemeen onderhoudsvrij. De capaciteit van een accupakket voor een BEV-bus is nog ongeveer 80% na 5-6 jaar van gebruik (OVPro, 2021), waarna ze aan vervanging toe zijn. Wanneer de accupakketten aan capaciteit inleveren worden de pakketten vervangen door de fabrikant.

Praktijktesten

Uit de literatuur blijkt dat er opleidingen zijn specifiek voor het werken aan elektrische voertuigen, waaronder bussen. Als verdere specialisatie worden opleidingen en trainingen vanuit de fabrikanten of vanuit de vervoerders opgezet.

3.8.2 Interviews

Vanuit de interviews blijkt dat voor het werken aan ZE-voertuigen verplichte fabriekstrainingen nodig zijn. Het werken aan HV-systemen vergt vereiste certificeringen voor de werkplaats en voor de monteurs. Voor het werken aan de elektrische installatie is een algemene training nodig om op hoog voltage (HV, 1.000 Volt) te mogen werken. De NEN 3840 is hier van toepassing voor het werken aan ZE-voertuigen. Er zijn geen specifieke richtlijnen voor bussen, deze vallen namelijk onder de algemene normen. Vervoerders hebben eigen werkplaatsen waar algemene reparaties worden uitgevoerd. Soms worden de ZE-aandrijving en -systemen hier ook onderhouden, of dit vindt bij de fabrikant plaats.

⁶ PGS = Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen.

ZE-bussen worden niet vaker op technische fouten gecontroleerd dan fossiel-aangedreven bussen. Specifiek op de aandrijving worden ZE-bussen natuurlijk anders gecontroleerd en onderhouden dan fossiel-aangedreven bussen. De elektromotor, accupakketten, en in het geval van een FCEV ook de brandstofcel, ondervinden minder slijtage dan een verbrandingsmotor en bijbehorende aandrijving. Tevens zijn er bij ZE-bussen technieken die de status van verschillende onderdelen van de bus op afstand in de gaten houden.

Onderhoud wordt tot aan het einde van de concessie uitgevoerd door de betreffende vervoerder. Wanneer een concessie overgaat naar een andere vervoerder verschuift de verantwoordelijkheid op onderhoud van de betreffende busvloot. Uit de interviews blijkt dat hier al een overnameregeling op zijn plaats is.

3.8.3 Conclusies

Uit het literatuuronderzoek en de interviews komt naar voren dat de veiligheidsrisico's die aanwezig zijn bij het werken aan ZE-bussen worden afgedekt door de reeds aanwezige algemene veiligheidsvoorschriften, -normen en technische opleidingen voor het mogen werken aan ZE-voertuigen. Vanuit de literatuur en de interviews blijkt niet dat er uit veiligheidsoverwegingen behoefte is naar specifieke opleidingen voor ZE-bussen. Fabrikanten en vervoerders hebben zo hun eigen (vervolg)opleidingen om specifiek aan de betreffende bussen te kunnen werken.

De verschillende gereedschappen, analyse- en onderhoudsmethoden voor elektrische componenten, installaties en voertuigen zijn opgenomen in algemene normen, zoals de NEN 3140 en NEN 9140. Binnen de werkplaats zijn er verschillende verantwoordelijkheden waarvoor technici opgeleid en gecertificeerd dienen te zijn. Dit varieert tussen een basisniveau voor een onderhoudskundige tot het mogen werken aan HV-systemen en het opstellen van risicoanalyses en onderhoudsplannen. De NEN 9140 schrijft voor wie welke werkzaamheden mag uitvoeren voor het werken aan HV-systemen. Daarbij wordt waterstof toegevoegd aan PGS26, de richtlijn die het stallen, onderhouden en repareren van motorvoertuigen op cng- en lng-installatie voorschrijft.

3.9 Te water geraking

3.9.1 Studies en publicaties

In de studie naar de veiligheid van elektrische personenauto's is onderzoek gedaan naar veiligheidsrisico's bij het te water raken van de auto. Veiligheidsrisico's worden vooral afgedekt door regelgeving waarin wordt voorgeschreven aan welke eisen een accupakket moet voldoen bij onder water staan, zodat bijvoorbeeld een elektrische schok voorkomen kan worden. Uit het onderzoek is daarnaast naar voren gekomen dat vervuild water en zoutwater meer risico met zich meebrengen ten aanzien van de brandveiligheid, omdat dit beter geleidt. De verwachting is echter dat het geen groot risico zal vormen omdat voorschriften mede zijn ontwikkeld voor een situatie waarbij er een overstroming optreedt (CE Delft, 2020). De regelgeving en risico's die naar voren zijn gekomen, zijn onafhankelijk van het type voertuig waarin het accupakket geplaatst wordt. Dat zou betekenen dat regelgeving voor accupakketten ook opgaat voor ZE-bussen.

Algemeen blijkt dat het in principe veilig is om naar een onderwaterstaand elektrisch voertuig te duiken om passagiers te redden. Onder spanning staande accuonderdelen mogen echter niet worden geopend of aangeraakt onder water (Gehandler, et al., 2017). Dit wordt onderschreven door de NFPA, die een bulletin heeft uitgebracht voor te water geraakte

elektrische voertuigen. In het bulletin staan daarnaast waarschuwingen door elektrische schok (dit komt zelden voor) en het niet mogen aanraken van beschadigde accupakketten (NFPA, 2017). Deze veiligheidsrisico's zijn algemeen van aard en niet specifiek voor ZE-bussen. Dit impliceert dat veiligheidsrisico's bij te water geraking niet anders zijn voor ZE-bussen dan bij andere ZE-voertuigen zoals personenauto's.

In de literatuur is geen nieuwe informatie te vinden over veiligheidsrisico's bij het te water raken van ZE-bussen ten opzichte van auto's. Het enige aanknopingspunt dat wij hebben gevonden is een nieuwbericht over een BEV-bus op Barbados bij zware regenval en overstromingen. In de betreffende situatie hebben de elektrische bussen goed gefunctioneerd. Op Barbados geldt dat bussen niet over of door water met een bepaalde waterhoogte mogen rijden. Hierin wordt echter geen onderscheid gemaakt tussen BEV-bussen en andersoortige bussen (NationNews, 2020).

3.9.2 Interviews

Vanuit de interviews is geen nieuwe informatie naar voren gekomen. Het enige punt dat aangehaald werd tijdens een interview betrof het BMS. Wanneer het accupakket van de bus in contact komt te staan met water, schakelt het specifieke veiligheidssysteem in het BMS de elektrische componenten van de bus uit.

3.9.3 Conclusies

Er is weinig literatuur beschikbaar over het te water raken van ZE-bussen. De verwachting is dat veiligheidsrisico's die gelden bij elektrische personenauto's bij te water geraking, ook op zullen gaan voor ZE-bussen, onder andere vanwege het gebruik van dezelfde type accupakketten. Vanwege de aanwezigheid van HV-systemen, gaat het bijvoorbeeld om het mogelijk optreden van een elektrische schok. Een verschil tussen personenauto's en bussen is de grootte van het voertuig. Dit kan een complicerende factor zijn bij incidentmanagement bij te water geraking. Of dit anders is bij ZE-bussen ten opzichte van fossiel-aangedreven bussen is niet naar voren gekomen uit de literatuur en de interviews.

3.10 Laad- en tankinfrastructuur

De laad- en tankinfrastructuur zijn van essentieel belang voor de uitrol van ZE-bussen. Zonder een adequaat netwerk aan laad- en tankinfrastructuur zijn ZE-bussen in het nadeel ten opzichte van fossiel-aangedreven bussen, die op een reeds wijdverspreid netwerk van tankinfrastructuur (diesel/cng) kunnen rekenen.

Het laden van BEV-bussen en het tanken van FCEV-bussen gaat als volgt:

- BEV-bussen laden buiten diensttijd op het depot om voldoende lading te hebben om overdag een dienst te kunnen rijden. Waar dit niet voldoende is kan er onderweg (bij een eindpunt of op een busstation) bijgeladen worden. Dit heet opportunity charging, waarbij er onderweg of op busstations snelladers staan waarmee de bussen bijladen.
- FCEV-bussen tanken bij waterstoftankstations op een druk van 350 bar.

Voor ZE-bussen geldt dat er op dit moment gebruik wordt gemaakt van private laad- en tankvoorzieningen als onderdeel van de concessie. FCEV-bussen kunnen ook tanken bij openbare waterstoftankstations, waarvan er enkele operationeel zijn in Nederland.

3.10.1 Studies en publicaties

Methoden voor elektrisch laden

BEV-bussen kunnen per dag 300, soms 350 kilometer, op een batterijlading rijden (CROW, 2020a). Een grotere accu zorgt ervoor dat een bus verder kan rijden op een enkele accu-lading. Dit scheelt in het aantal benodigde opportunitylaadpunten tijdens de route, waardoor infrastructuurkosten verminderd kunnen worden. Het voordeel van gelegenheidsladen is dat er meer gereden kan worden op een accu of dat een kleinere accu gebruikt kan worden. Op rustpunten aan het einde van een lijn of op een knooppunt, waar de chauffeur pauze heeft, is het mogelijk om de bus op te laden. Dit scheelt in voertuiggewicht en in productiekosten van het voertuig. Uiteindelijk is dit een afweging tussen voertuig- en infrastructuurkosten en de dienstregeling.

Wanneer een bus gestald wordt op het depot is er voldoende tijd om de bus op te laden. Hiervoor wordt dan ook geladen met een stekker of pantograaf op relatief lage vermogens. Het vermogen is hoog genoeg om gedurende de nacht de bus volledig op te laden, waarna de bus de totale dienst of een groot gedeelte van de dienst kan rijden op deze lading. Opportunity charging vindt plaats tussen diensten of op een rustmoment aan het einde van de lijn. Hier wordt met hoog vermogen in korte tijd de accu bijgeladen om zo genoeg energie te hebben om de dienst (verder) af te ronden (MRCagney, 2017).

Op het depot laden BEV-bussen via een stekker (Plug-in Combo 2) of via een pantograaf. Pantograafladen wordt in Nederland op twee manieren uitgevoerd; 'Up' en 'Down' (ElaadNL, 2017). 'Up' gaat door een arm bovenop de bus verticaal naar boven te bewegen tegen een laadbak. 'Down' beweegt juist een arm vanuit de laadpaal naar de bus toe. In Nederland gaat opportunity charging momenteel via pantograafladen.

Laden via inductie wordt momenteel bij ov-bussen niet toegepast in Nederland. In een eerder stadium is inductieladen gebruikt voor de binnenstadslin in Utrecht, echter bleek dit systeem op dat moment onvoldoende te functioneren. Het gebruik van inductie lijkt in de praktijk niet eenvoudig te werken, omdat de inductieplaten zeer gevoelig zijn voor de plaatsing van de bus. Alleen wanneer de chauffeur de bus precies boven de inductieplaat wist te parkeren, laadt de bus ook daadwerkelijk op. Dit probleem is mogelijk snel te verhelpen door middel van parkeerhulpsystemen zoals die ook bij personenauto's worden toegepast (ElaadNL, 2017). Inductieladen wordt door verschillende partijen gezien als een aantrekkelijke methode voor de toekomst omdat de bus contactloos geladen kan worden boven een plaat. Op dit moment is dit echter nog (te) experimenteel en niet geschikt voor grote vermogens. De rendementen zijn nog niet vergelijkbaar met conductief (stekker of andere directe aansluiting) laden en het is nog niet productierijp voor ZE-bussen.

Een alternatief binnen opportunity charging is het SRS-systeem, waarbij het er direct contact wordt gemaakt met een 'collector shoe' (Alstrom, 2021), een plaat op de weg waar de bus contact mee kan maken bij stilstand.

Veiligheidsaspecten bij elektrisch laden

BEV-bussen laden met hoge vermogens en communiceren met het BMS. BEV-bussen worden opgeladen op het depot of onderweg (bijv. op rustpunten aan het einde van een lijn). We hebben het hier dan over fossieladen op het depot en gelegenheidsladen (opportunity

charging) onderweg of op een rustpunt. In volgend tekstkader staan twee voorbeelden van incidenten bij het laden van bussen in een remise en een busstation.

Brand in Stuttgart

In september 2021 is er in Stuttgart een busremise met 25 bussen afgebrand. Volgens de eerste bevindingen uit onderzoeken blijkt dat het laadproces van één van de twee BEV-bussen de brand zou hebben veroorzaakt. De twee BEV-bussen waren voorzien van solid state-batterijen. Deze batterijen zitten nog in de ontwikkelingsfase, maar over enkele jaren wordt verwacht dat deze batterijen vaak gebruikt zullen worden. In het nieuwsbericht wordt genoemd dat de BEV-bussen met solid state-batterijen in theorie veiliger zijn dan fossiel-aangedreven dieselbussen, omdat thermal runaway minder makkelijk kan ontstaan. Het overladen van de batterijen is mogelijk de oorzaak geweest, wat duidt op een defect in het BMS. [Depotbrände verunsichern Verkehrsbetriebe](#)

Vanuit het onderzoek naar de brand in Stuttgart blijkt dat de brand is ontstaan door het laden van de BEV-bussen. Dit komt naar voren uit de brandmeldinstallatie en de bijbehorende temperatuursensoren. Naar de exacte technische oorzaak wordt nog onderzoek gedaan. [Elektrobus löste Großbrand aus - München zieht E-Fahrzeuge aus dem Verkehr](#)

In 2021 zijn er twee branden geweest in Hannover en Düsseldorf, ook hier zijn o.a. BEV-bussen afgebrand. Er is niet te achterhalen waar en bij welke bussen de brand is ontstaan vanwege de hevigheid van de brand. Volgens de Vereniging van Duitse Transportbedrijven (VDV) zijn de BEV-bussen niet brandgevaarlijk. Het probleem voor de grote branden wordt veroorzaakt doordat remises te klein zijn voor het grote aantal bussen wat hier gestald wordt. Uiteindelijk hebben diverse, maar niet alle, vervoerders de inzet van BEV-bussen tijdelijk stopgezet. [Depotbrände verunsichern Verkehrsbetriebe](#)

Brand Edam

In januari 2019 is er in Edam brand uitgebroken in een BEV-bus. De brand ontstond op het busstation van Edam waarbij de bus gedeeltelijk afgebrand is. Ten tijde van de brand stond de bus te laden op het station middels pantograafladen. Het laadproces werd tijdens de brand niet onderbroken. Hierdoor werd er een grote inzet van brandweer en politie ingezet. [Elektrische bus in brand busstation Edam \(video\)](#)

In (IFV; Van der Staak, 2020) wordt genoemd dat de brand zou zijn ontstaan door kortsluiting in de airconditioningunit van de bus. Het laden van de bus heeft niet voor de brand gezorgd, echter heeft het pantograafladen wel voor complicaties gezorgd tijdens het blussen, omdat de spanning op de bus is blijven staan. Het is onduidelijk waarom het laden niet onderbroken werd tijdens de brand.

In 2020 heeft het IFV een onderzoek gedaan naar de veiligheidsaspecten van het laadproces van BEV-bussen (IFV; Van der Staak, 2020). Uit het onderzoek komt naar voren dat er veel richtlijnen en normen zijn voor het laadproces. Deze richten zich op het voertuig, op de pantograaf en op de accupakketten. Er zijn geen specifieke veiligheidsnormen voor de passagiers voor tijdens het laden. Echter, de borging van de passagiersveiligheid is voor een groot deel geborgd in de afzonderlijke veiligheidsnormen voor de bus en voor de laadvoorziening.

Communicatie-eisen tussen elektrische voertuigen en laadinfrastructuur is opgenomen in de ISO 15118-standaard (Elaad, 2018). Hieronder valt bijvoorbeeld ook pantograafladen. In onderzoek van IFV (IFV; Van der Staak, 2020) komt naar voren dat (laad)veiligheid geen formeel aanbestedingsaspect is bij bussen. Het is volgens het IFV wenselijk dat er een objectief afwegingskader komt voor de realisatie van laadveiligheid van elektrische bussen en dat de afweging op veiligheid buiten de concurrentiesfeer om plaatsvindt in aanbestedingen. Het is dan de verantwoordelijkheid van de vervoerder om een veiligheidsplan op te

stellen dat voldoet aan de eisen van het aanbesteding en dat de verantwoordelijke veiligheidsregio dit toetst en accepteert voordat de betreffende concessie ingaat.

Een ander aandachtspunt wat IFV; Van der Staak (2020) aanhaalt is dat het van belang is om technische risico's en afhandlungsstrategieën van hulpdiensten en andere betrokkenen, zoals busvervoerder en gemeenten, te kennen in geval van een incident. Er is bij bovengenoemde partijen, maar ook bij concessieverleners en keuringsinstanties, onvoldoende kennis van de thermische, chemische en elektrische risico's bij het snelladen met grote publieksstromen in de openbare ruimtes, zoals een busstation, aldus IFV.

Elektrisch laden en regelgeving

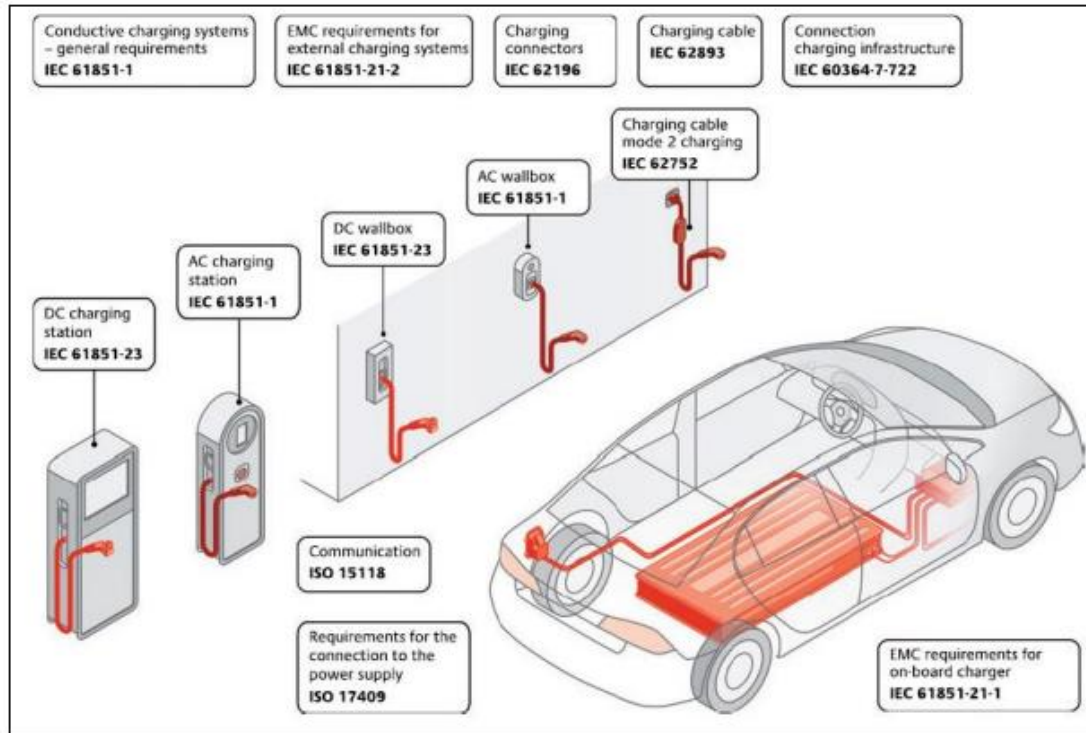
Alle fysieke componenten van de laadinfrastructuur dienen gecertificeerd te zijn, van connectoren en kabel tot aan de laadvoorziening waarin alle componenten samenkomen (zie ook Figuur 9). De laadinfrastructuurregelgeving is van toepassing op: de fysieke componenten, laadstations, installaties en de informatie-uitwisseling (EC, 2017a). Voor publiekladen is de NEN 3140 van kracht, een richtlijn voor laagspanning- en installatieverantwoordelijkheid (NEN, 2019a). Er is hierdoor sprake van een ketenverantwoordelijkheid om de veiligheid van het hele laadsysteem te waarborgen. Aangezien de laadinfrastructuur bij bussen onderdeel uitmaakt van de concessie ligt de verantwoordelijkheid bij de vervoerders om de benodigde veiligheidsmaatregelen te treffen.

ISO 15118 is een internationale standaard voor communicatie tussen elektrische voertuigen en laders, en beschrijft ook inductieladen, panto-up en panto-down en kan daarnaast gebruikt worden voor vehicle-to-grid (V2G). Daardoor zijn de mogelijkheden tot smart charging en V2G in principe gelijk aan die bij personenauto's (ElaadNL, 2017).

NEN 3140 is de Nederlandse norm voor o.a. veilige bedrijfsvoering en werkzaamheden aan laagspanningsinstallaties (<1.000 volt AC of <1.500 volt DC) (NEN, 2019a). Ook is er de Nederlandse norm voor het werken aan hoogspanningsinstallaties, namelijk de NEN 3840 (NEN, 2019b).

IEC 62196 is een reeks internationale normen die eisen en tests definiëren voor stekkers en connectoren voor het opladen van elektrische voertuigen. IEC 61851 is een internationale norm voor laadinfrastructuur voor elektrische voertuigen, waaronder AC- en DC-laden, voor lichte en zware voertuigen (IFV, 2020b).

Figuur 9 - Europese standaarden voor laden met kabel



Bron: European Commission (EC, 2017a).

Inzet van laadinfrastructuur bij knooppunten

De laadinfrastructuur is onderdeel van de concessie en valt onder de verantwoordelijkheid van de vervoerder. Daarbij heeft de laadinfrastructuur een overnameregeling bij het overgaan van de concessie (CROW, 2020c). Het kan voorkomen dat er bij een knooppunt meerdere vervoerders (uit verschillende concessies) samenkomen. Rotterdam Zuidplein kan hier als voorbeeld genomen worden; hier komen namelijk buslijnen van vijf vervoerders samen. Het gevaar bestaat dat er een wildgroei aan laadinfrastructuur en netaansluitingen ontstaat op de stations met meerdere losse aansluitingen (OVPro, 2019). Doordat concessies op verschillende momenten in de tijd worden aanbesteed, realiseren vervoerders ook op verschillende momenten de laadinfrastructuur (incl. de aansluiting).

Een mogelijk veiligheidsaspect hierbij is in het geval van een incident aan de laadinfrastructuur. Het kan namelijk onduidelijk zijn voor de hulpdiensten om welk type systeem het gaat, wie verantwoordelijk is voor het systeem en bij wie informatie ingewonnen kan worden ten tijde van een incident.

Op zulke knooppunten is mogelijk een regierol nodig. Vanuit de literatuur komen enkele oplossingen naar voren; de ov-autoriteit kiest de assets (netaansluiting en laadinfrastructuur) en realiseert de laadlocaties; ov-autoriteit realiseert laadlocaties en schrijft deze voor (Provincie Utrecht, 2018); de regie van het knooppunt overlaten aan een serviceprovider (Charge Point Operator (CPO)) met een mix aan gepland en ongepland laden (OVPro, 2019).

Tanken van waterstof

Het tanken van waterstof vindt plaats bij een waterstoftankstation en wordt over het algemeen gedaan buiten de diensttijden om (Fuel Cell Electric Buses, 2020). Het tankproces is vergelijkbaar met het tanken bij een fossiel tankstation. Er wordt gebruik gemaakt van een vulpistool en – afhankelijk van de configuratie – is het mogelijk de bussen in tien minuten vol te tanken op een druk van 350 bar (ZE Bus, 2020).

Enkele randvoorwaarden voor het tanken van waterstof zijn de NEN 17127 en ISO 19880 (EC, 2019). NEN 17127 definieert de minimumvereisten om de interoperabiliteit van openbare waterstofstations te waarborgen, incl. tankprotocollen die waterstof afgeven aan wegvoertuigen (NEN, 2020). ISO 19880 definieert de minimale ontwerp-, installatie-, exploitatie-, bedrijfsvoering-, inspectie- en onderhoudseisen voor de veiligheid en prestaties van openbare- en niet-openbare waterstoftankstations. Fabrikanten van waterstoftankstations kunnen additionele veiligheidseisen toepassen. Hoewel ISO 19880 is bedoeld voor lichte voertuigen worden ook de vereisten en richtlijnen voor middelzware- en zware voertuigen behandeld (NEN, 2020).

Gedurende het tanken volgt de chauffeur de procedure die tijdens trainingen is vastgesteld. Tijdens het tanken is de bus geaard om eventuele statische lading (vonken) tegen te gaan. Wanneer er lekkage ontstaat tijdens het tanken wordt dit gesignaleerd door de bus waarbij er een alarm zal afgaan. Een kleine hoeveelheid waterstof kan ontsnappen bij het ontkoppelen van de tankslang. Echter, deze hoeveelheid is zeer gering en zal snel oplossen in de atmosfeer (Fuel Cell Electric Buses, 2020). Verder zijn de tankslangen voorzien van een break-away-koppeling: een systeem die de vulslang laat breken als de auto nog aangekoppeld is, maar weggrijdt. Het systeem schakelt zich dan in zijn geheel uit (IFV, 2019a).

Figuur 10 - Een FCEV-bus bij het waterstoftankstation in Rhoo (2017)



Bron: BNdestem⁷.

⁷ [In Rhoo heeft Air Liquide een commercieel uitgerust tankstation voor waterstof](#)

Voor het afleveren van waterstof is een vergunning vereist. De PGS35-richtlijn schrijft een arbeidsveilige, milieuveilige en brandveilige toepassing voor van installaties voor het afleveren van waterstof aan voertuigen en werktuigen.

PGS35 is van toepassing op;

- het aanleveren van vloeibare en gasvormige waterstof;
- het afleveren van gasvormige waterstof aan wegvoertuigen;
- de waterstofinstallatie, incl. vaste of mobiele opslag van vloeibare of gasvormige waterstof;
- openbaar toegankelijke tankstations voor waterstof.

PGS35 beschrijft o.a. de interne veiligheidsafstanden, bepaald door stralingsberekeningen tussen de diverse installatieonderdelen. Ook bevat PGS35 voorschriften voor opslag en bevoorrading. PGS35 is in 2015 tot stand gekomen. Tot aan dat moment werd uitgegaan van NPR8099, de Nederlandse Praktijk Richtlijn voor de brandveilige, arbeidsveilige en milieuveilige toepassing van installaties voor het afleveren van waterstof aan voer- en vaartuigen (H2Platform, 2020a). PGS35 is maatgevend voor zowel de initiatiefnemer van het tankstation als voor het bevoegde gezag, de randvoorwaarden, wettelijke eisen en normen van het waterstoftankstation. PGS35 geeft de specifieke voorschriften voor veilig ontwerp en dient als een toetsingsinstrument om de veiligheidsvoorwaarden te controleren.

Daarnaast kan de betreffende veiligheidsregio op grond van de Wet veiligheidsregio's aanvullende maatregelen adviseren. In Nederland zijn alle huidige waterstofstations op een redelijk uniforme manier tot stand gekomen, met daarbij enkele contextuele zaken die zorgden voor maatwerk (H2Platform, 2020a). Verdere onderzoeken die deel uitmaken van het aanvragen en ontwikkelen van een waterstoftankstation zijn een: QRA-veiligheidsonderzoek voor impact op externe veiligheid; een explosie veiligheidsdocument; een noodplan; WBR-vergunning en een HAZOP-veiligheidsstudie (H2Platform, 2020a). Verder dient er een bouw- en omgevingsvergunning (indien productie waterstof bij het station) en een bestemmingsplan wijziging ingediend te worden voor de bouw van een waterstoftankstation.

3.10.2 Interviews

Vanuit de interviews komt naar voren dat de keuze voor het type laden, zoals opportunity-laden (panto-up, panto-down) of stekkerladen, niet afhangt van het niveau van veiligheid. De veiligheid van al deze methoden van laden wordt als gelijk beschouwd. Verder kwam naar voren dat de implementatie van laadinfrastructuur mede afhankelijk is van andere modaliteiten. Hierin moet rekening gehouden worden met de specifieke omstandigheden van de betreffende locatie, denk hierbij bijvoorbeeld aan een busstation bij een treinstation. Hiervoor worden risicoanalyses opgezet om de risico's in kaart te brengen. Mochten de risico's acceptabel zijn, dan kan er laadinfrastructuur aangelegd worden. Wanneer dat niet zo is, dan dient de laadinfrastructuur voor bussen elders te komen.

Bij BEV-bussen staat op het wegdek aangegeven waar de bus dient te staan wanneer de pantograaf gebruikt gaat worden. In de bus wordt een signaal afgegeven wanneer er verbinding gemaakt wordt voor het laden. Wanneer er een gevaarlijke situatie ontstaat tijdens het laden van ZE-bussen wordt er een signaal doorgegeven aan de centrale, die vervolgens de politie/brandweer kan alarmeren. De laadcyclus kan door meerdere omstandigheden onderbroken worden maar op afstand kan niet worden vastgesteld wat de oorzaak is. De chauffeur(s) of omstanders moeten dan de situatie doorgeven aan de alarmcentrale. Volgens geïnterviewden is de kans op doorladen tijdens het stopzetten van het laadproces praktisch nul.

De snelheid van laden wordt gereguleerd door het BMS. Wanneer de temperatuur van het accupakket of de hoeveelheid stroom die binnen komt te hoog is, dan communiceert het BMS dit met het laadsysteem. De batterijlevensduur gaat sneller achteruit bij het laden op hoog vermogen (snelladen). Tevens leidt snelladen op hoog vermogen tot een hogere temperatuur in het accusysteem.

Volgens enkele geïnterviewden wordt op knooppunten de regie genomen door de betreffende autoriteit, dat kan een gemeente zijn of een metropoolregio. Een lastig punt hierin is dat meerdere vervoerders hier samenkomen en zij in verschillende stadia van de concessie zitten. Hierdoor kan het zijn dat verschillende vormen van laadinfrastructuur ingezet worden door de verschillende concessies, die op moment van ingaan van de concessie 'state of the art' waren. Vanuit de interviews komt een wisselend beeld naar voren hoe hier mee omgegaan kan worden. Enerzijds wordt er gesteld dat één regiepartij voor de laadinfrastructuur kan helpen bij de standaardisatie van laadsystemen op het betreffende knooppunt. Anderzijds wordt genoemd dat dit uiteindelijk door de vervoerders zelf zal worden opgelost, aangezien dit het meest efficiënt zal zijn. Vanuit de interviews komt niet een direct veiligheidsaspect naar voren.

Waterstof wordt, bij de geïnterviewde vervoerders, getankt nadat de dienst klaar is. Dit wordt gedaan door een aparte ploeg die de bus schoonmaakt en tankt. De afspraak is dat er elke dag (na de dienst) getankt wordt. Bij het tanken worden de vulsnelheden en vulgraden door de compressor van het tankstation bepaald. Hierbij wordt tijdens het tanken van waterstof data uitgewisseld tussen de bus en het tankstation, om zo de status te monitoren.

3.10.3 Conclusies

Veel BEV-bussen hebben genoeg range om een gemiddelde dagdienst te kunnen rijden. Opportunity charging zorgt ervoor dat de range groter wordt waardoor meer diensten gereden kunnen worden voordat het accupakket leeg is. Uit de literatuur blijkt dat er veel normen, certificaten en richtlijnen op zijn plaats zijn voor het laden van BEV-bussen en het tanken van waterstof voor FCEV-bussen. Alle componenten van de laadinfrastructuur dienen gecertificeerd te zijn voordat deze in gebruik genomen mogen worden. Er zijn geen specifieke normen voor ZE-bussen. Uit de interviews blijkt dat er geen voorkeur is voor het type laden op het gebied van veiligheid.

Het is wenselijk dat er een objectief afwegingskader komt voor de realisatie van laadveiligheid van BEV-bussen en dat de afweging op veiligheid buiten de concurrentiesfeer om plaatsvindt in aanbestedingen. Het is daarbij van belang dat partijen, zoals vervoerders, gemeenten, concessieverleners en keuringsinstanties voldoende kennis hebben van de risico's van snelladen in de publieke ruimte.

Bij een knooppunt zoals een regionaal busstation kunnen verschillende typen laadinfrastructuur voor opportunity charging aanwezig zijn. Elke concessie is namelijk verantwoordelijk voor zijn eigen (type) laadinfrastructuur. Er zijn momenteel verschillende visies hoe hier standaardisatie in aangebracht kan worden, of hoe en door welke instantie een regierol opgepakt kan worden hierin.

FCEV-bussen worden elke dag getankt en het tanken wordt gedaan na diensturen door apart personeel. Meerdere veiligheidssystemen in de laadinfrastructuur zijn aanwezig die de status van de bus monitoren tijdens het tanken. In Nederland worden veiligheids- en bouweisen gesteld aan het opzetten van waterstoftankstations. Vanuit de literatuur komt niet naar voren dat er kennishiaten zijn op de veiligheid van het tanken van waterstof en de waterstoftankinfrastructuur.

4 Kennishiaten

Veel veiligheidsaspecten van ZE-bussen zijn in beeld. Er is veel kennis voorhanden over deze veiligheidsaspecten in zowel de literatuur als bij experts op het gebied van veiligheid van voertuigen. De kennishiaten die we in dit hoofdstuk presenteren zijn naar voren gekomen uit het hoofdonderzoek in Hoofdstuk 3. We hebben in het onderzoek gekeken naar negen veiligheidsthema's gerelateerd aan ZE-bussen. De kennishiaten zijn in het onderzoek naar één of meerdere thema's naar voren gekomen. De raakvlakken van de kennishiaten met de thema's is weergegeven in Tabel 6.

We geven per kennishiaat een beschrijving en daarnaast formuleren we met welk doel vervolgonderzoek uitgevoerd kan worden en welke vervolgstappen daarvoor nodig zijn. Daarbij geven we aan welke partijen mogelijk geschikt zijn om het onderzoek of de vervolgstappen uit te voeren, en we zullen een inschatting geven van de kosten die daarmee gemoeid gaan. Omdat het lastig is om een exacte kosteninschatting te maken voor andere partijen die met het wegnemen van de kennishiaten aan de slag gaan, zullen we werken met bandbreedtes:

- €: lage kosten tot ongeveer € 25.000;
- €€: middelhoge kosten tussen de € 25.000 en € 50.000;
- €€€: hoge kosten vanaf € 50.000.

Tabel 6 - Raakvlakken kennishiaten met de thema's

	Voertuigveiligheid	Accupakketten en waterstoftanks	Afwezigheid van geluid	Brandveiligheid	Veiligheid in besloten ruimtes	Incidentmanagement	Onderhoud en veiligheid	Te water geraking	Laad- en tankinfrastructuur
Kennishiaat 1: gebrek aan empirische data over de impact ZE-technieken op de omvang van een incident in geval van een botsing	x								
Kennishiaat 2: de veiligheidseisen die gesteld worden ten aanzien van het ontwerp, de functionering en het testen van ZE-bussen	x					x			
Kennishiaat 3: het uitwisselen van kennis en ervaring na incidenten met ZE-bussen						x			
Kennishiaat 4: delen informatie toedracht van incidenten met ZE-bussen						x			
Kennishiaat 5: de interactie met de omgeving bij brand met een ZE-bus op een ov-knooppunt				x	x	x			x
Kennishiaat 6: het bergen van ZE-bussen na een brand						x			
Kennishiaat 7: ontwerprichtlijnen voor het stallen van ZE-bussen in stallingen en busremises					x				

Uit Tabel 6 komt naar voren dat de meeste kennishiaten raken aan het thema incident-management en onderling sterk aan elkaar raken. Voor vervolgonderzoek zou daarom kunnen worden overwogen om de onderzoeken naar de vijf hiaten te bundelen en uit te zetten als één opdracht. In deze rapportage behandelen we de kennishiaten separaat en het is aan potentiële opdrachtgevers om de onderzoeken eventueel te bundelen.

4.1 Kennishiaat 1: Gebrek aan empirische data over de impact ZE-technieken op de omvang van een incident in geval van een botsing

Naar voren gekomen in: Paragraaf 3.2.

Als onderdeel van dit onderzoek hebben we onderzocht of er resultaten van botstesten beschikbaar zijn van ZE-bussen. Het doel hiervan was om te achterhalen wat de impact van ZE-technieken is op de omvang van incidenten met bussen in geval van een botsing.

Het is waarschijnlijk dat busfabrikanten op vrijwillige basis botstesten uitvoeren met bussen, maar daarvan hebben wij geen resultaten kunnen vinden in de literatuur (zowel fossiel-aangedreven als ZE) en interviews. Daarnaast is een mogelijke oorzaak voor het gebrek aan resultaten van botstesten en computersimulaties de kosten die gepaard gaan met het opzetten en uitvoeren ervan. Aan de andere kant moeten bussen voldoen aan eisen om de weg op te mogen en botstesten zouden hier onderdeel van kunnen zijn. Botstesten voor ZE-voertuigen zijn geformuleerd in GTR13 (FCEV) en GTR20 (BEV).

Het gevolg van het gebrek aan resultaten van botstesten, is dat er een gebrek is aan empirische data over de impact van ZE-technieken op de omvang van een botsing indien deze plaatsvindt. Zolang deze data niet beschikbaar is, blijft het lastig om veiligheidsrisico's te kwantificeren. Om een goede vergelijking te kunnen maken van de veiligheidsrisico's tussen ZE- en fossiel-aangedreven bussen, is het noodzakelijk om een vergelijking te maken met resultaten en eisen van botstesten van fossiel-aangedreven bussen. Randvoorwaarde is dat eisen en resultaten beschikbaar zijn voor beide type aandrijvingen.

Vervolgonderzoek en vervolgstappen

Het doel van vervolgonderzoek is om na te gaan of botstesten met ZE-bussen worden uitgevoerd en wat daarvan de resultaten zijn.

Vervolgstappen:

- inventariseren of/en op welke manier eisen aan botstesten worden gesteld in de (EU-) toelating van bussen (zowel fossiel-aangedreven als ZE);
- inventariseren welke eisen er gesteld worden aan botstesten met fossiel-aangedreven en ZE-bussen;
- bij fabrikanten inventariseren of botstesten met fossiel-aangedreven en ZE-bussen worden uitgevoerd en of daarvan resultaten (openbaar) beschikbaar zijn;
- nagaan of er verschillen zijn in eisen voor botstesten tussen fossiel-aangedreven bussen en ZE-bussen;
- De resultaten van botstesten bundelen (indien resultaten beschikbaar zijn).

Inschatting project

In Tabel 7 geven wij een inschatting van mogelijke uitvoerende partijen, de kosten en de periode waarin het resultaat van het project beschikbaar komt bij uitvoering.

Tabel 7 - Inschatting project kennishiaat 'gebrek aan empirische data over de impact ZE-technieken op de omvang van een incident in geval van een botsing'

	Inschatting
Uitvoerende partij	Een ingenieurs- of adviesbureau gespecialiseerd in veiligheid en voertuigtesten.
Kosten	€
Periode waarin resultaat beschikbaar komt	Het uitvoeren van dit onderzoek kan snel starten en zal vooral afstemming met voertuigfabrikanten behoeven. Daar zal de meeste tijd in gaan zitten. De doorlooptijd van een dergelijk project zou enkele maanden kunnen zijn, afhankelijk van de beschikbaarheid van informatie.

4.2 Kennishiaat 2: De veiligheidseisen die gesteld worden ten aanzien van het ontwerp, de functionering en het testen van ZE-bussen

Naar voren gekomen in: Paragrafen 3.2 en 3.7.

Uit de interviews is naar voren gekomen dat er onduidelijkheid bestaat over de veiligheidseisen die worden gesteld aan ZE-bussen in de Europese typegoedkeuring. Dit is niet alleen het geval bij ZE-bussen maar geldt voor bussen in het algemeen.

Vervolgonderzoek en vervolgstappen

Het doel van vervolgonderzoek is om in beeld te brengen welke veiligheidseisen er worden gesteld in de Europese typegoedkeuring ten aanzien van het ontwerp, functionering, testen van ZE-bussen.

Vervolgstappen:

- nagaan wat de veiligheidseisen zijn rondom Europese typegoedkeuring van fossiel-aangedreven en ZE-bussen bij de Europese Commissie;
- vergelijken van deze eisen voor typegoedkeuring fossiel-aangedreven en ZE-bussen.

Inschatting project

In Tabel 8 geven wij een inschatting van mogelijke uitvoerende partijen, de kosten en de periode waarin het resultaat van het project beschikbaar komt bij uitvoering.

Tabel 8 - Inschatting project kennishiaat 'de veiligheidseisen die gesteld worden ten aanzien van het ontwerp, de functionering en het testen van ZE-bussen'

	Inschatting
Uitvoerende partij	RDW
Kosten	€
Periode waarin resultaat beschikbaar komt	Om de juiste informatie te krijgen, zijn in een dergelijk onderzoek afhankelijkheden. Dit heeft te maken met de gesprekken die gevoerd moeten worden en of er voldoende informatie beschikbaar is over het onderwerp. Het is daardoor lastig om een tijdsindicatie aan te geven waarbinnen de resultaten beschikbaar komen.

4.3 Kennishiaat 3: Het uitwisselen van kennis en ervaring na incidenten met ZE-bussen

Naar voren gekomen in: Paragraaf 3.7.

Uit het onderzoek is naar voren gekomen dat de incidentbestrijding van ZE-bussen anders is dan bij fossiel-aangedreven (fossiel-aangedreven) ov-bussen. Omdat ZE-bussen op een andere manier zijn aangedreven, is de praktijkervaring die wordt opgedaan bij incidenten juist belangrijk zodat daar lering uit getrokken kan worden. Zowel uit de literatuur als uit de interviews is naar voren gekomen dat het bundelen van kennis en ervaring van incidenten de ontwikkeling van de bussen en het incidentmanagement ten goede zal komen. Dit is een punt dat ook naar voren is gekomen in de studie naar veiligheidsaspecten van BEV-personenauto's (CE Delft, 2020).

Om de veiligheid van ZE-bussen te kunnen vergelijken met het huidige fossiele alternatief, is er meer kennis nodig over mogelijke oorzaken en verloop van incidenten. Op dit moment is er weinig praktijkervaring met incidenten waarbij ZE-bussen betrokken zijn omdat er weinig incidenten hebben plaatsgevonden. Dit heeft ermee te maken dat er wereldwijd relatief weinig ZE-bussen rondrijden in verhouding tot fossiel-aangedreven bussen. Daarnaast zijn deze bussen nog in opkomst en rijden deze op de meeste plekken nog niet lang rond. Zelfs bij een aangenomen gelijkblijvende kans op incidenten bij fossiel-aangedreven en ZE-bussen, is het daarmee te verwachten dat het aantal incidenten met ZE-bussen ook toe gaan nemen. Dit staat los van de eigenschappen van ZE-bussen, maar heeft te maken met het aantal ZE-bussen dat op de weg rond zal gaan rijden.

Om tegemoet te komen aan de behoefte om te leren van incidenten, heeft IFV een landelijke database met bijbehorend [dashboard](#) ingericht waar informatie over incidenten met ZE-voertuigen is gebundeld. In oktober 2021 is er een eerste halfjaarlijkse rapportage gepubliceerd waarin wordt gereflecteerd op de aantallen en aard van incidenten met alternatief-aangedreven voertuigen. Daarnaast zijn er aandachtskarten beschikbaar voor het bestrijden van incidenten met ZE-bussen vanuit Brandweer Nederland.

Vervolgonderzoek en vervolgstappen

Het doel van vervolgonderzoek is het opzetten van een proces om structureel te evalueren bij incidenten en het formuleren van *lessons learned* uit deze incidenten.

Vervolgstappen vervolgonderzoek:

- In dit onderzoek gaat het om het doorlopend evalueren van incidenten op basis van de verzamelde informatie over toedracht, verloop en beheersing. Dit is een stap die herhaaldelijk uitgevoerd zou moeten worden zodat nieuwe kennis en ervaring toegepast kunnen gaan worden. De vorm van evaluatie is afhankelijk van de doelgroep. Zo kan er gedacht worden aan een rapportage waarbij incidenten worden geëvalueerd, maar ook aan themasessies waarbij informatie wordt uitgewisseld met een brede groep stakeholders, waaronder ov-autoriteiten of in de programmagroep BAZEB (daarin wordt kennis uitgewisseld tussen ov-opdrachtgevers)

Inschatting project

In Tabel 9 geven wij een inschatting van mogelijke uitvoerende partijen, de kosten en de periode waarin het resultaat van het project beschikbaar komt bij uitvoering.

Tabel 9 - Inschatting project vervolgonderzoek kennishiaat 'het uitwisselen van kennis en ervaring na incidenten met ZE-bussen'

	Inschatting
Uitvoerende partij	Een partij uit de keten van incidentmanagement in nauwe samenwerking met het IFV
Kosten	€€€: de kosten schatten wij hoog in vanwege het doorlopende karakter
Periode waarin resultaat beschikbaar komt	Het project kan direct worden uitgevoerd en het resultaat zal over de jaren heen verbeterd worden als er meer informatie beschikbaar komt

4.4 Kennishiaat 4: Delen informatie toedracht van incidenten met ZE-bussen

Naar voren gekomen in: Paragraaf 3.7.

Als voorwaarde voor het kunnen leren van incidenten is dat er informatie beschikbaar komt over de toedracht van incidenten. Het IFV neemt bussen al mee in de monitoring.

Bij het uitvoeren van dit onderzoek is geprobeerd om informatie rondom de toedracht van incidenten te verzamelen maar dit bleek in de praktijk lastig. De partijen die zijn benaderd, konden of mochten (nog) geen informatie verstrekken rondom de toedracht van de incidenten. Dit is tegenstrijdig met de brede wens om kennis en ervaring op te doen op basis van incidenten. Het lukt dus niet altijd om onderzoeksrapporten naar aanleiding van incidenten te raadplegen. Dit is wel noodzakelijk om te kunnen leren van incidenten.

Vervolgonderzoek en vervolgstappen

Het doel van het vervolgonderzoek is om afspraken te maken met verschillende partijen over het delen van informatie over de toedracht van incidenten met ZE-bussen.

Vervolgstappen vervolgonderzoek:

- Als eerste stap zou onderzocht moeten worden waarom het moeilijk is om informatie over de toedracht van incidenten te verzamelen. Voor deze stap is het noodzakelijk om gesprekken te voeren met diverse partijen uit de keten, zoals incidentmanagers en verzekeraars.
- Ten tweede moet in kaart gebracht worden welke stappen er genomen moeten worden om informatie over de toedracht van incidenten te delen.
- Als laatste stap zouden er afspraken gemaakt moeten worden met verschillende betrokken partijen over het delen van informatie over de toedracht van incidenten. Denk hierbij bijvoorbeeld aan onder welke voorwaarden informatie gedeeld mag worden.

Inschatting project

In Tabel 10 geven wij een inschatting van mogelijke uitvoerende partijen, de kosten en de periode waarin het resultaat van het project beschikbaar komt bij uitvoering.

Tabel 10 - Inschatting project vervolgonderzoek kennishiaat ‘delen informatie toedracht van incidenten met ZE-bussen’

	Inschatting
Uitvoerende partij	Een partij uit de keten van incidentmanagement.
Kosten	€€: de kosten schatten wij middelhoog in vanwege de vele partijen die betrokken zijn.
Periode waarin resultaat beschikbaar komt	Het project kan direct worden uitgevoerd. Het is moeilijk in te schatten hoe lang het duurt voordat het resultaat beschikbaar komt vanwege de afspraken die gemaakt moeten worden met meerdere partijen.

4.5 Kennishiaat 5: De interactie met de omgeving bij brand met een ZE-bus op een ov-knooppunt

Naar voren gekomen in: Paragrafen 3.5, 3.6, 3.7 en 3.10.

De interactie van een bus met zijn omgeving is complex: een bus vervoert passagiers en kan zich in een besloten ruimte bevinden (remise, tunnel, busstation) waarbij omstanders en andere bussen of voertuigen van andere modaliteiten aanwezig kunnen zijn. Daarnaast zijn er ov-knooppunten waar verschillende vervoerders actief zijn, waardoor meerdere partijen betrokken kunnen zijn bij een incident.

In vergelijking met fossiel-aangedreven bussen zijn er voor ZE-bussen specifieke aspecten waar rekening mee moet worden gehouden bij de interactie met de omgeving in het geval van incidentbestrijding. Zo kunnen er op knooppunten verschillende soorten laadinfrastructuur aanwezig zijn, die mogelijk bij verschillende vervoerders horen. Ook zijn er met de komst van ZE-bussen meer manieren waarop een bus aangedreven kan worden. In het geval van een incident moet daar rekening mee worden gehouden, vooral als de bussen met verschillende aandrijvingen samenkomen. Zo brengt een diesel-aangedreven bus bij brand andere veiligheidsaspecten met zich mee dan bijvoorbeeld een BEV-bus.

In ons onderzoek is de interactie met de omgeving naar voren gekomen in zowel de literatuur als in de interviews. Dit speelt met name bij brandveiligheid en niet zozeer bij andere incidenten. We hebben echter niet in beeld kunnen brengen wat de effecten zijn op de veiligheid van de omgeving in bepaalde situaties.

Vervolgonderzoek en vervolgstappen

Het doel van vervolgonderzoek is om het effect te bepalen op de omgeving in het geval van brand met een ZE-bus op een knooppunt.

Vervolgstappen:

- Het ontwikkelen van scenario's: hiermee kan een inschatting gemaakt worden van welke situaties van belang zijn om te onderzoeken. Parameters die hierin kunnen worden meegenomen zijn bijvoorbeeld: grootte van het knooppunt, aantal modaliteiten, aantal vervoerders, typen laadinfrastructuur, type bussen (verschillende aandrijvingen).
- Inschatting veiligheidsrisico's bij scenario's op basis van kwalitatief of kwantitatief onderzoek. Per scenario kan een inschatting gemaakt worden of de risico's in kaart gebracht kunnen worden op basis van literatuuronderzoek.

Inschatting project

In Tabel 11 geven wij een inschatting van mogelijke uitvoerende partijen, de kosten en de periode waarin het resultaat van het project beschikbaar komt bij uitvoering.

Tabel 11 - Inschatting project kennishiaat 'de interactie met de omgeving bij brand met een ZE-bus op een OV-knooppunt'

	Inschatting
Uitvoerende partij	Een ingenieurs- of adviesbureau gespecialiseerd in scenariobeschouwingen (brand)veiligheid.
Kosten	€/€€€: de kosten zullen sterk afhankelijk zijn van het aantal scenario's en parameters dat beschouwd wordt. Daarnaast zal het maken van een computer-simulatie kostbaarder zijn dan het uitvoeren van kwalitatief onderzoek.
Periode waarin resultaat beschikbaar komt	Afhankelijk van het aantal scenario's schatten wij dit in op 6-12 maanden.

4.6 Kennishiaat 6: Het bergen van ZE-bussen na een brand

Naar voren gekomen in: Paragraaf 3.7.33.7.

Het bergen van ZE-bussen na een incident komt in de praktijk voor, maar over het bergen van ZE-bussen na brand bestaan nog onduidelijkheden. De oplossingen voor het bergen van ZE-bussen na brand zijn nu het blussen van de bus of het gecontroleerd laten uitbranden. Na het wegslepen van de bus kan de bus bijvoorbeeld in een lekbak geplaatst worden. Hier is er slechts één van beschikbaar in Nederland.

Vervolgonderzoek en vervolgstappen

Het doel van vervolgonderzoek is om te inventariseren welke oplossingen er zijn voor het bergen van ZE-bussen na een brand.

Vervolgstappen:

- Uitdagingen in kaart brengen rondom het bergen van ZE-bussen: wij hebben in dit onderzoek een inventarisatie uitgevoerd naar het bergen van ZE-bussen. We bevelen aan om dit verder uit te diepen samen met bergers en andere incidentbestrijders.
- Oplossingen bedenken bij de uitdagingen voor bergers: wij adviseren om hierbij de hele keten te betrekken, dus fabrikanten, vervoerders, incidentmanagers en verzekeraars. Gedacht kan worden aan de volgende oplossingsrichtingen:
 - Technisch: aanpassingen aan de bus om wegslepen en blussen (makkelijker) mogelijk te maken.
 - Voorzieningen buiten de bus: denk hierbij aan het ontwikkelen van apparatuur of oplossingen, specifiek gericht op ZE-bussen (Bij personenauto's is dit bijv. een dompelcontainer. Wat zijn mogelijke voorzieningen bij bussen?).
 - Protocolen: mogelijk draagt het ontwikkelen van een protocol voor het bergen van ZE-bussen bij aan het oplossen van het probleem. Voor personenauto's is een soortgelijk traject in gang gezet (CE Delft, 2020). Dit traject kan ondersteund worden door het voeren van gesprekken met fabrikanten en eventueel aanvullend literatuuronderzoek waarbij specifiek gekeken wordt naar aspecten waar vragen over ontstaan gedurende het traject.
- Implementatie van oplossingen.

Inschatting project

In Tabel 12 geven wij een inschatting van mogelijke uitvoerende partijen, de kosten en de periode waarin het resultaat van het project beschikbaar komt bij uitvoering.

Tabel 12 - Inschatting project kennishiaat 'het bergen van ZE-bussen na een brand'

	Inschatting
Uitvoerende partij	Een partij uit de keten van incidentmanagement (bijvoorbeeld de branchevereniging van bergers).
Kosten	€€: We schatten in dat de kosten van dit traject in de categorie 'middelhoog' vallen. Dit heeft te maken met de vele betrokken partijen en meerdere oplossingsrichtingen waarnaar gekeken moet worden. De kosten van het implementeren van de oplossingen moeilijk in te schatten. Het ontwikkelen van een protocol zal waarschijnlijk binnen deze kosten vallen, maar het toepassen van technische aanpassingen aan de bus zal meer kosten met zich meebrengen.
Periode waarin resultaat beschikbaar komt	Het traject om oplossingsrichtingen te bepalen kan naar schatting binnen een half jaar worden afgerond. Voorwaarde hierbij is dat de verschillende partijen de urgentie zien en tijd vrij maken voor het project. Het implementeren van oplossingen zal langer in beslag nemen. De snelheid waarmee dit zal plaatsvinden, is sterk afhankelijk van de gekozen oplossing(en).

4.7 Kennishiaat 7: Ontwerprichtlijnen voor het stallen van ZE-bussen in stallingen en busremises

Naar voren gekomen in: Paragraaf 3.6.

Met betrekking tot de ontwerprichtlijnen voor ZE-bussen in stallingen en remises hebben wij de volgende bevindingen gedaan:

- Voor ruimtes groter dan 1.000 m² is geen regelgeving voor handen. Vaak zijn besloten ruimtes waarin ZE-bussen komen, groter dan 1.000 m².
- In ruimtes kleiner dan 1.000 m² mogen meerdere ZE-bussen in dezelfde ruimte gestald worden volgens regelgeving. Er leven echter vragen of dit (brand)veilig is, met name bij stallingen. Dit is onder andere naar voren gekomen bij een incident in Duitsland. Naar aanleiding van dat incident is de vraag gesteld: zou er preventief compartimentering aangebracht moeten worden?

Vervolgonderzoek en vervolgstappen

Wij onderscheiden twee vervolgonderzoeken:

1. Het doel van Vervolgonderzoek 1 is om ontwerpeisen te formuleren voor het stallen van ZE-bussen in remises of stallingen om (brand)incidenten te voorkomen.
2. Het doel van Vervolgonderzoek 2 is om te onderzoeken welke vorm van eisenstellen het best past bij het ontwerpen van een stalling of busremise waarin zich ZE-bussen begeven (bijv. het opstellen van een ontwerprichtlijn, meenemen in aanbestedings-eisen).

Deze vervolgonderzoeken kunnen achtereenvolgens worden uitgevoerd.

Vervolgstappen Vervolgonderzoek 1:

- Een risicoanalyse uitvoeren voor het stallen van ZE-bussen in een remise of stalling. Parameters die hierin meegenomen zouden kunnen worden: aantal ZE-bussen per m², eigenschappen van de ruimte (ventilatie, laadpunten), samenstelling van aandrijvingen (een percentage BEV, een percentage FCEV, of juist verschillende aandrijvingen scheiden), grootte (<1.000 m² of >1.000 m²). Hierbij moet ook een relatie gelegd worden met richtlijnen voor batterijopslag.
- Op basis van de risicoanalyse ontwerpeisen formuleren voor het stallen van ZE-bussen in remises en stallingen. Hierbij kan gedacht worden aan eisen ten aanzien van compartimentering, ventilatie en aantal bussen per m².

Vervolgstappen Vervolgonderzoek 2:

- De eerste stap bestaat uit het voeren van inventariserende gesprekken:
 - Gesprekken met concessieverleners over het stellen van eisen over het stallen van ZE-bussen. Welke eisen worden er nu gesteld? Wat zijn de mogelijkheden om ontwerpeisen die naar voren komen uit Vervolgonderzoek 1 mee te nemen in een aanbesteding?
 - Gesprekken met BZK over de mogelijkheid om ontwerpeisen ten aanzien van het stallen van ZE-bussen op te nemen in het bouwbesluit.
- Afspraken maken met betrokken partijen over de vorm van eisen stellen en implementatietijd.

Inschatting project

In Tabel 13 en Tabel 14 geven wij een inschatting van mogelijke uitvoerende partijen, de kosten en de periode waarin het resultaat van het project beschikbaar komt bij uitvoering.

Tabel 13 - Inschatting Vervolgonderzoek 1 kennishiaat 'ontwerprichtlijnen voor het stallen van ZE-bussen in stallingen en busremises'

	Inschatting
Uitvoerende partij	Een ingenieurs- of adviesbureau gespecialiseerd in (brand)veiligheid
Kosten	€€€: Wij schatten de kosten voor het uitvoeren van de risicoanalyse en het opstellen van ontwerpeisen hoog in.
Periode waarin resultaat beschikbaar komt	Wij schatten dit in op 6-12 maanden.

Tabel 14 - Inschatting Vervolgonderzoek 2 kennishiaat 'ontwerprichtlijnen voor het stallen van ZE-bussen in stallingen en busremises'

	Inschatting
Uitvoerende partij	Een ingenieurs- of adviesbureau gespecialiseerd in (brand)veiligheid.
Kosten	€
Periode waarin resultaat beschikbaar komt	Wij schatten dit in op ongeveer 6 maanden.



5 Conclusie

5.1 Hoofdconclusie

Een groot aantal veiligheidsaspecten dat gepaard gaat met de inzet en exploitatie van ZE-bussen is goed in beeld. Er kan veel geleerd worden van de ervaringen die zijn opgedaan bij batterij- en waterstof-elektrische personenauto's. Echter, op een aantal onderdelen zijn er verschillen (bijv. de grootte van de voertuigen en accupakketten en de druk in de brandstoftank).

ZE-bussen moeten, net als fossiel-aangedreven bussen, aan strenge veiligheidseisen voldoen om de weg op te mogen. Uit het onderzoek is naar voren gekomen dat er geen aanwijzingen zijn dat de veiligheidsrisico's bij ZE-bussen groter zijn dan bij fossiel-aangedreven bussen, maar wel dat de risico's anders zijn.

Het grootste veiligheidsrisico bij BEV-bussen is het optreden van een *thermal runaway* in het accupakket. Dit is een proces waarbij door een verhoogde temperatuur of interne weerstand in de cellen van accupakketten brand kan ontstaan, waarna toxische gassen vrijkomen.

Bij FCEV-bussen is naar voren gekomen dat één van de belangrijkste veiligheidsaspecten het optreden van een fakkelflam is. Deze treedt op bij het vrijkomen van waterstof uit de waterstoftank indien deze in aanraking komt met een externe ontstekingsbron. Een ander aspect is het vrijkomen van waterstof in besloten ruimtes, waardoor de waterstof kan oplopen (met mogelijk explosiegevaar als gevolg).

De literatuur en kennis van experts wijzen niet op een hoge kans van optreden van deze veiligheidsrisico's.

De veiligheidsrisico's vragen met name om een andere benadering van het incidentmanagement. De grootte van de bussen speelt hierbij een rol, omdat oplossingen die voorhanden zijn voor personenauto's niet altijd toepasbaar zijn voor bussen (bijv. dompelcontainers). Daarnaast is er door de kans op het opnieuw ontbranden van BEV-bussen veel bluswater nodig vanwege de accugrootte. Het wegslepen en bergen van ZE-bussen komt in de praktijk voor bij incidenten (bijv. bij het stilstaan van een bus), maar bij het bergen van ZE-bussen na brand bestaan nog onduidelijkheden. Momenteel zijn er binnen het werkveld incidentmanagement ontwikkelingen om te kunnen leren van incidenten. Bij deze ontwikkelingen zijn onder andere incidentmanagers maar ook verzekeraars en busfabrikanten betrokken. Zo is er bijvoorbeeld een database met bijbehorend dashboard ontwikkeld door IFV waarin informatie staat over incidenten met alternatief-aangedreven voertuigen. Ook zijn er aandachtscarten ontwikkeld door Brandweer Nederland over het bestrijden van incidenten met ZE-voertuigen.

Naast bovengenoemde risico's, zijn specifieke risico's voor ZE-bussen weinig aan bod gekomen in de literatuur (bijv. de interactie tussen de bus en de omgeving van de bus bij een incident op een ov-knooppunt). Dit zijn aspecten die nader onderzocht kunnen worden. Een gedeelte van deze aspecten is opgenomen als kennishiaten in de studie. De meeste kennishiaten hebben raakvlakken met het incidentmanagement van ZE-bussen. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de veiligheidsrisico's die gepaard gaan met de inzet en exploitatie van ZE-bussen vragen om een andere benadering van het incidentmanagement dan fossiel-aangedreven bussen. In het onderzoek zijn aanbevelingen gedaan voor de wijze waarop de kennishiaten kunnen worden weggenomen.

5.2 Beantwoording onderzoekvragen

Voor dit onderzoek zijn een zestal onderzoekvragen geformuleerd die centraal hebben gestaan bij de uitvoering van het onderzoek. We geven in deze paragraaf antwoord op deze vragen.

Welke veiligheidsaspecten spelen een rol bij de inzet en exploitatie van ZE-bussen?

De belangrijkste veiligheidsaspecten die uit het onderzoek naar voren zijn gekomen, zijn:

- Het optreden van een thermal runaway bij BEV-bussen.
- Het optreden van een fakkel bij FCEV-bussen bij activering van het TPRD in geval van brand.
- Het ophopen van een gaswolk in een besloten ruimte bij FCEV-bussen in geval van lekkage van waterstof uit de waterstoftank. Dit kan leiden tot explosiegevaar.

Welke partijen spelen een rol bij deze veiligheidsaspecten?

In Bijlage A en Bijlage C staat een overzicht van de partijen die betrokken zijn geweest bij dit onderzoek. Dit geeft een beeld van welke partijen een rol spelen bij de veiligheidsaspecten. De partijen lopen uiteen van fabrikanten, partijen uit de exploitatie en het onderhoud van ZE-bussen tot vergunning- en concessieverleners.

Welke relevante informatie in binnen- en buitenland is bekend op dit gebied?

Voor dit onderzoek hebben we 153 bronnen uit de literatuur bestudeerd en daarnaast 15 partijen gesproken die met ZE-bussen te maken hebben. De relevante informatie is uitgebreid aan bod gekomen in Hoofdstuk 3.

Welke lessons learned zijn er op basis van incidenten met ZE-bussen?

In dit onderzoek is geprobeerd om een compleet overzicht te maken van incidenten met ZE-bussen, inclusief de oorzaak van de incidenten en bijzonderheden. Een dergelijk overzicht was lastig te maken omdat informatie niet makkelijk of helemaal niet gedeeld kon worden. In Hoofdstuk 3 staat een aantal tekstboxen die aansluiten bij de inhoud van de paragrafen waarin de incidenten beschreven zijn. Waar mogelijk is dit aangevuld met de achterliggende oorzaak van het incident. Daarnaast bevat Bijlage E een totaaloverzicht van de incidenten die in Hoofdstuk 3 behandeld worden.

Welke veiligheidsaspecten/kennishiaten dienen verder uitgezocht te worden bij de inzet en exploitatie van ZE-bussen?

We hebben in dit onderzoek 7 kennishiaten geïdentificeerd:

1. Gebrek aan empirische data over de impact van ZE-technieken op de omvang van een incident in geval van een botsing. Het proces rondom de Europese typegoedkeuring van ZE-bussen.
2. De veiligheidseisen die gesteld worden ten aanzien van het ontwerp, de functionering en het testen van ZE-bussen.



3. Het uitwisselen van kennis en ervaring na incidenten met ZE-bussen.
4. Delen informatie toedracht van incidenten met ZE-bussen.
5. De interactie met de omgeving bij brand met een ZE-bus op een ov-knooppunt.
6. Het bergen van ZE-bussen na een brand.
7. Ontwerprichtlijnen voor het stallen van ZE-bussen in stallingen en busremises.

In Hoofdstuk 4 hebben wij een uitgebreide beschrijving gegeven van de kennishiaten en aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek.

Welke randvoorwaarden gelden er voor nader onderzoek van de kennishiaten?

De randvoorwaarden zijn per kennishiaat beschreven in Hoofdstuk 4.



Bibliografie

ABCB, 2021. *Australian Fire Engineering Guidelines*, Canberra: Australian Building Codes Board.

AIChE Academy, 2020. *Hydrogen Safety: Tank Thermally Activated Pressure Relief Devices (TPRDs) (YouTube video)*. [Online]
Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=-WYqLVomaRU>
[Geopend 16 11 2021].

Alstom, 2021. *SRS: Innovative, safe and automatic charging for trams and electric buses*. [Online]
Available at: <https://www.alstom.com/our-solutions/infrastructure/srs-innovative-safe-and-automatic-charging-trams-and-electric-buses>
[Geopend 29 09 2021].

AMT, 2019a. *Emissievrije buswerkplaats (z)onder hoogspanning van Connexxion*. [Online]
Available at: <https://www.amt.nl/werkplaats-onderhoud/artikel/2019/12/emissievrije-buswerkplaats-zonder-hoogspanning-van-connexxion-10164990>
[Geopend 28 09 2021].

AMT, 2019b. *EV-Veilig werken is norm(aal)*. [Online]
Available at: https://www.amt.nl/werkplaats-onderhoud/artikel/2019/04/ev-veilig-werken-is-normaal-10162511?_login=1
[Geopend 1 10 2021].

Andersson, P., Brandt, J. & Willstrand, O., 2016. *Full scale fire-test of an electric hybrid bus*, Boras, Sweden: SP Technical Research Institute of Sweden.

ANWB, sd *Waterstofauto: hoe werkt het?*. [Online]
Available at: <https://www.anwb.nl/auto/elektrisch-rijden/elektrische-autos/waterstofauto-hoe-werkt-het>
[Geopend 16 11 2021].

BA Systemen, 2020. *Explosiegevaar meten voor stof en gas*. [Online]
Available at: <https://www.basystemen.nl/explosiegevaar-meten-voor-stof-en-gas/?cn-reloaded=1>
[Geopend 6 12 2021].

Battery University, 2019. *BU-908: Battery Management System (BMS)*. [Online]
Available at: https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_monitor_a_battery
[Geopend 21 09 2020].

Bethoux, O., 2020. Hydrogen Fuel Cell Road Vehicles and Their Infrastructure: An Option towards an Environmentally Friendly Energy Transition. *Energies*, Volume 13, p. 6132.

Biind magazine, 2021. *Ebusco 3.0: minder gewicht en grotere range*. [Online]
Available at: <https://magazine.biind.nl/extra-ze-2019/ebusco-30/>
[Geopend 6 12 2021].



Brandweer Nederland, 2018. *Bestrijding incidenten Voertuigbrand met H2 - Aandachtskaart*. [Online]
Available at: <https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/20190628-BRWNL-Aandachtskaart-H2-Voertuigbrand.pdf>

Brandweer.nl, 2018a. *Brandweer Haaglanden onthult haar nieuwe tankautospuiter*. [Online]
Available at: <https://www.brandweer.nl/haaglanden/nieuws-haaglanden/brandweer-haaglanden-onthult-nieuwe-tankautospuiter>
[Geopend 23 10 2020].

Brandweeracademie, 2020a. *Zakkaart Handelingsperspectief bij e-voertuigen*. [Online]
Available at: <https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/20200629-BA-Zakkaart-Handelingsperspectief-bij-e-voertuigen.pdf>
[Geopend 2020].

Brandweeracademie, 2020b. *Aandachtskaart Bestrijding incident e-voertuig (hybride of elektrisch voertuig)*. [Online]
Available at: <https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/20200506-BA-Aandachtskaart-bestrijding-incident-e-voertuig.pdf>
[Geopend 2020].

Brigade, 2020. *Bussen en Touringcars*. [Online]
Available at: <https://brigade-electronics.com/nl/industrieen/bus-touringcar-voertuig-veiligheid/>
[Geopend 19 08 2021].

CE Delft, 2020. *Veiligheid en elektrische personenauto's. Actualisatie factsheet 2020*, Delft: CE Delft.

Civitas; TNO, 2013. *Policy note: Smart choices for cities - Clean buses for your city*.
sl:Civitas.

Clean Technica, 2018. *Do electric vehicles have better overall safety? Part 2*. [Online]
Available at: <https://cleantechnica.com/2018/04/01/do-electric-vehicles-have-better-overall-safety-part-2/>
[Geopend juni 2020].

CROW, 2020a. *Alle ov-bussen zero emissie in 2030 lijkt haalbaar*. [Online]
Available at: <https://www.crow.nl/over-crow/nieuws/2020/juni/alle-ov-bussen-zero-emissie-in-2030-likt-haalbaar>
[Geopend 29 09 2021].

CROW, 2020b. *Geluidssignalen bij elektrische bussen - Een nieuw vraagstuk*, Ede: CROW.

CROW, 2020c. *Zero-emissiebus, hoe doe je dat?*, Ede: CROW.

CROW, 2021. *Monitor zero-emissiebussen Nederland*. [Online]
Available at: <https://www.crow.nl/getattachment/Kennis/Bibliotheek-Verkeer-en-Vervoer/Kennisdocumenten/Monitor-zero-emissiebussen-voortaan-elk-kwartaal/Monitor-ZE-bussen-3e-kwartaal-2021.pdf.aspx?lang=nl-NL&ext=.pdf>
[Geopend 11 11 2021].



Daimler, 2009. *The future has arrived: World premiere of the Mercedes-Benz Citaro FuelCELL-Hybrid bus*. [Online]
Available at: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/The-future-has-arrived-World-premiere-of-the-Mercedes-Benz-Citaro-FuelCELL-Hybrid-bus.xhtml?oid=9271703>
[Geopend 1 10 2021].

DEKRA, 2021. *Other Crash Tests*. [Online]
Available at: <https://www.dekra.com/en/other-crash-tests/>
[Geopend 14 12 2021].

Ebusco, 2021. *Ebusco 2.2*. [Online]
Available at: <https://www.ebusco.com/nl/elektrische-bussen/ebusco-2-2/>
[Geopend 23 09 2021].

Ebusco, 2021. *Nederlandse primeur: 39 volledig composieten, elektrische bussen van Ebusco gaan rijden in Gooi en Vechtstreek*. [Online]
Available at: <https://www.ebusco.com/nl/nederlandse-primeur-39-volledig-composieten-elektrische-bussen-van-ebusco-gaan-rijden-in-gooi-en-vechtstreek/>
[Geopend 6 12 2021].

EC, 2017a. *e-MObility Transnational strategy for an Interoperable COmmunity and Networking in the Alpine Space*, Brussels: European Commission (EC).

EC, 2017b. *Hydrogen monitoring requirements in the global technical regulation on hydrogen and fuel cell vehicles*. [Online]
Available at: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC106642>
[Geopend 8 10 2021].

EC, 2019. *Refueling Protocols for Medium and Heavy-Duty Vehicles*. [Online]
Available at: https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_FCH-04-2-2019
[Geopend 12 9 2021].

EC, 2020. *Pioneering system to greatly reduce risk of fire in electric buses : Automated e-buses Lithium Ion Battery Early Warning and Fire Suppression System :. Research*eu*, Issue 92 , pp. 17-18.

ECN, 2009. *ECN-facts: Brandstofcellen en waterstof*. sl:ECN.

Economic Times of India, 2019. *How safe are electric vehicles?*. [Online]
Available at: <https://auto.economictimes.indiatimes.com/news/passenger-vehicle/cars/how-safe-are-electric-vehicles/70589648>
[Geopend 27 08 2020].

Elaad, 2018. *Exploring the public key infrastructure for ISO 15118 in the EV charging ecosystem*, Arnhem: Elaad.

ElaadNL, 2017. *Marktverkenning elektrische bussen*. [Online]
Available at:
https://www.elaad.nl/uploads/downloads/downloads_download/ElaadNL_Marktverkenning



Elektrische Bussen november 2017.pdf
[Geopend november 2021].

electrek, 2018. *Regenerative braking: how it works and is it worth it in small EVs?*. [Online]
Available at: <https://electrek.co/2018/04/24/regenerative-braking-how-it-works/>
[Geopend 22 09 2020].

ETSC, 2019. *European Parliament backs new vehicle safety standards*. [Online]
Available at: <https://etsc.eu/european-parliament-backs-new-vehicle-safety-standards/>
[Geopend 18 08 2021].

EUR-Lex, 2019. *Document 32007L0046*. [Online]
Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/ALL/?uri=CELEX:32007L0046>
[Geopend 7 12 2021].

Europees Parlement, 2020. *General safety of vehicles and protection of vulnerable road users, briefing*. [Online]
Available at:
[https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2018\)625192](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2018)625192)
[Geopend 2021].

EV database, 2021. *Accu capaciteit van elektrische auto's*. [Online]
Available at: <https://ev-database.nl/cheatsheet/accu-capaciteit-elektrische-auto>
[Geopend 23 09 2021].

FCH 2 JU, 2019. *Operators' guide to fuel cell bus deployment*, sl: Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH2JU).

Foorginezhad, S. et al., 2021. Sensing advancement towards safety assessment of hydrogen fuel. *Journal of Power Sources*, Issue 489.

Forman Vehicle Services, 2020. *Fire Suppression Systems for Alternative Fuel Vehicles*. [Online]
Available at: <https://www.formanvehicleservices.com/fire-suppression-for-clean-energy-vehicles/>
[Geopend 25 August 2021].

Forman Vehicle Services, sd V-AVAS. Roelcliffe: Forman Vehicle Services.

Fuel Cell Electric Buses, 2020. *How a Hydrogen Fuel Cell Bus Works (Infographic)*. [Online]
Available at: <https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/fuel-cell-electric-buses-fuel-cell-electric-buses/how-hydrogen-fuel-cell-bus-works-infographic>
[Geopend 16 11 2021].

Fuel Cell Electric Buses, 2020. *Safety*. [Online]
Available at: <https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/safety-framework/safety-measures-while-refuelling-hydrogen-station>
[Geopend 28 09 2021].

Fuel Cell Electric Buses, 2021. *Codes/Standards/Regulations*. [Online]
Available at: <https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/codesstandardsregulations->



framework/codesstandardsregulations
[Geopend 18 08 2021].

Gehandler, J., Karlsson, P. & Vylund, L., 2017. *Risks associated with alternative fuels in road tunnels and underground garages*, Boras (SE): SP Technical Research Institute of Sweden.

Gehandler, J., Karlsson, P. & Vylund, L., 2017. *Risks associated with alternative fuels in road tunnels and underground garages*, Boras, Sweden: SP Technical Research Institute of Sweden.

Glover, A. M., Baird, A. R. & LaFleur, C. B., 2020. *Hydrogen Fuel Cell Vehicles in Tunnels*, sl: Sandia National Laboratories.

Green Car Future, 2018. *Are Hydrogen Cars Dangerous/Flammable? Crash Test Results*. [Online]
Available at: <https://www.greencarfuture.com/hydrogen/hydrogen-danger-testing>
[Geopend 18 08 2021].

H2 safety panel, 2015.
Safety Considerations for Hydrogen and Fuel Cell Applications.pdf. [Online]
Available at:
https://h2tools.org/sites/default/files/Safety_Considerations_for_Hydrogen_and_Fuel_Cell_Applications.pdf
[Geopend 5 July 2021].

H2Platform, 2020a. *Vergunningproces waterstof tankstations*, sl: H2Platform.

H2Platform, 2020b. *Waterstof in parkeergarages*. [Online]
Available at: <https://opwegmetwaterstof.nl/waterstof-in-parkeergarages/>
[Geopend 12 juli 2021].

H2Platform, 2021. *Ons werk rond veiligheid (WVIP)*. [Online]
Available at: <https://opwegmetwaterstof.nl/ons-werk-rond-veiligheid-wwip/>
[Geopend 9 11 2021].

Hyundai, 2020. *Part 4: Hydrogen, Is It Safe? (YouTube video)*. [Online]
Available at:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjwrrqorcD0AhVGNOWKHbynBTMQwqsBegQIBBAB&url=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3DGpRyn5-ZbPU&usq=AOvVaw0DFQJxcq_Lqx CZpT1IN8on
[Geopend November].

IFV; Van der Staak, 2020. *Veiligheidsaspecten van het laadproces van elektrische bussen in de openbare ruimte in de IJssel-Vecht concessie*, Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid.

IFV; Van der Staak, 2020. *Veiligheidsaspecten van het laadproces van elektrische bussen in de openbare ruimte in de IJssel-Vecht concessie*, Arnhem, Nederland: Instituut Fysieke Veiligheid.

IFV, 2016. *Brandveiligheid van elektrische bussen*, Arnhem: IFV.



IFV, 2017. *Brandveiligheid elektrische bussen in relatie tot tunnelveiligheid*, Arnhem, Nederland: IFV.

IFV, 2018. *Waterstof als brandstof voor voertuigen - aandachtspunten voor incidentbestrijding*, Arnhem, NL: IFV.

IFV, 2019a. *Aandachtskaart H2 tankstation*, Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid (IFV).

IFV, 2019b. *Aandachtskaarten waterstof incidentbestrijding*. [Online]
Available at: <https://www.ifv.nl/kennisplein/veilige-energietransitie/publicaties/aandachtskaarten-waterstof>
[Geopend 25 11 2021].

IFV, 2020a. *Veiligheidsaspecten van waterstof in een besloten ruimte*, Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid (IFV).

IFV, 2020b. *Veiligheidsaspecten van het laadproces van elektrische bussen in de openbare ruimte in de IJssel-Vecht concessie*, Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid (IFV).

IFV, 2020c. *Brandveiligheid van parkeergarages met elektrisch aangedreven voertuigen*, Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid (IFV).

IFV, 2020d. *Richtlijn voor brandweeroptreden bij elektrische voertuigen*. [Online]
Available at: <https://www.ifv.nl/kennisplein/veilig-optreden-bij-moderne-voertuigen/publicaties/richtlijn-voor-brandweeroptreden-bij-elektrische-voertuigen>
[Geopend 23 09 2020].

IFV, 2021a. *Berekeningen aan waterstoffakkels met behulp van HyRAM*, Arnhem: IFV.

IFV, 2021b. *Onderzoek sprinklerinstallatie parkeergarage*. [Online]
Available at: <https://www.ifv.nl/nieuws/Paginas/Onderzoek-sprinklerinstallatie-parkeergarage.aspx>
[Geopend 25 11 2021].

IFV, 2021c. *Waterstofautos in parkeergarages*, Arnhem, NL: IFV.

IFV, 2021d. *Eerste halfjaarrapportage incidenten met alternatief-aangedreven voertuigen*. [Online]
Available at: <https://www.ifv.nl/nieuws/Paginas/Eerste-halfjaarrapportage-incidenten-met-alternatief-aangedreven-voertuigen.aspx>
[Geopend 9 12 2021].

IFV, 2021e. *Berekeningen aan waterstoffakkels met behulp van HyRAM*, Arnhem: IFV.

Insideevs, 2021. *Can Vertically Mounted Battery Packs Boost EV Range By 30%?*. [Online]
Available at: <https://insideevs.com/news/511589/vertically-mounted-battery-boost-range/>
[Geopend 09 11 2021].

Intelligent Transport, 2019. *Europe's first comprehensive Bus Safety Standard puts automated tech to the test*. [Online]



Available at: <https://www.intelligenttransport.com/transport-articles/77822/bus-safety-standard-trl-tfl/#:~:text=Europe%27s%20first%20comprehensive%20Bus%20Safety%20Standard%20puts%20automated%20tech%20to%20the%20test&text=The%20Mayor%20of%20London%27s%20Road,deaths%20>
[Geopend 18 08 2021].

iosh magazine, 2021. *How safe are hydrogen fuel cells in vehicles?*. [Online]
Available at: <https://www.ioshmagazine.com/2021/05/27/how-safe-are-hydrogen-fuel-cells-vehicles>
[Geopend 18 08 2021].

iosh magazine, 2021. *HOW SAFE ARE HYDROGEN FUEL CELLS IN VEHICLES?*. [Online]
Available at: <https://www.ioshmagazine.com/2021/05/27/how-safe-are-hydrogen-fuel-cells-vehicles>
[Geopend 18 08 2021].

ISO, 2021. *ISO/TC 98/SC 3 Loads, forces and other actions*. [Online]
Available at: <https://www.iso.org/committee/50958.html>
[Geopend 8 12 2021].

ITTHub, 2020. *145 zero-emission and low-emission buses for Northern Ireland as hydrogen arrives*. [Online]
Available at: <https://itthub.net/coach-bus-minibus/100-zero-emission-and-low-emission-buses-for-northern-ireland-as-hydrogen-arrives/>
[Geopend 24 08 2021].

Japan Automobile Research Institute, sd *Presentation on theme: "Japan Automobile Research Institute"*. [Online]
Available at: <https://slideplayer.com/slide/12067799/>
[Geopend 17 11 2021].

Kim, S. W., 2020. *Heavy duty HFCV safety issue and research plan in Korea*. Paris, Korea Automobile Testing and Research Institute.

Larsson, F., Anderson, J., Andersson, P. & Mellander, B. -E., 2016. *Bus Fire Safety: Safer battery systems in electric buses*. [Online]
Available at: <https://www.intelligenttransport.com/transport-articles/19587/bus-fire-safety-battery-systems-electric-buses/>
[Geopend 08 juli 2021].

Lecocq, A., Bertana, M., Truchot, B. & Marlair, G., 2012. *Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle*. Chicago, International Conference on Fires In Vehicles - FIVE.

Lee, K., Lee, J. & Yong, G., 2011. *Assessment of Safety for Hydrogen Fuel Cell Vehicle*. sl:Korea Automobile Testing and Research Institute.

Li, Y. Z., 2018. *Study of fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels*, Boras, Sweden: RISE Research Institutes of Sweden.



Maak Industrie Nieuws, 2021. *Internationaal Testcentrum voor Elektrische Voertuigen vestigt zich in Arnhem*. [Online]

Available at: <https://www.maakindustrie.nl/nieuws/automotive/internationaal-testcentrum-voor-elektrische-voertuigen-vestigt-zich-in-arnhem/>

[Geopend 19 08 2021].

Manners, 2020. *Reageer jij sneller dan Tesla's automatische noodrem? Test het hier*.

[Online]

Available at: <https://www.manners.nl/tesla-auto-pilot-reactiesnelheid/>

[Geopend 22 09 2020].

Markusik, S. & Bułkowski, A., 2021. Cybersecurity in Electric Bus Public Transport Systems. *Electromobility in public transport : Driving towards cleaner air*, pp. 169-188.

Mazumder, H., Hassan, M. E., M.Ektesabia & A.Kapoor, 2012. Performance analysis of EV for different mass distributions to ensure safe handling. *Energy Procedia*, Volume 14, pp. 949-954.

Milojević, S., 2014. *Optimization of the hydrogen system for city busses with respect to the traffic safety*. Gwangju, 20th World Hydrogen Energy Conference.

MRCagney, 2017. *Electric Bus Technology*, Auckland (NZ): MRCagney.

NationNews, 2020. *Rain no problem for electric buses*. [Online]

Available at: <https://www.nationnews.com/2020/10/08/rain-no-problem-electric-buses/>

[Geopend 24 08 2021].

Nedstack, 2021. *European consortium to standardise fuel cell modules for heavy duty applications: the "StasHH mission"*. [Online]

Available at: <https://nedstack.com/en/news/european-consortium-standardise-fuel-cell-modules-heavy-duty-applications-stashh-mission>

[Geopend 18 08 2021].

NEN, 2019a. *NEN 3140, relevante eisen voor bedrijfsvoering van laagspanningsinstallaties*.

[Online]

Available at:

<https://www.nen.nl/elektrotechniek/werkvoorschriften/hoogspanningsinstallaties>

[Geopend 1 10 2021].

NEN, 2019b. *NEN 3840: werken aan hoogspanningsinstallaties*. [Online]

Available at:

<https://www.nen.nl/elektrotechniek/werkvoorschriften/laagspanninginstallaties>

[Geopend 1 10 2021].

NEN, 2020. *NEN-EN 17127: Vulpunten voor waterstof in de buitenruimte waarbij gasvormige waterstof wordt afgegeven en vulprotocollen worden gebruikt*. [Online]

Available at: <https://www.nen.nl/nen-en-17127-2020-en-277580>

[Geopend 9 12 2021].

NEN, 2020. *NEN-ISO 19880-1:2020 - Gasvoermig waterstof - Vulstations - Deel1: Algemene eisen*. [Online]

Available at: <https://www.nen.nl/nen-iso-19880-1-2020-en-269665>
[Geopend 9 12 2021].

NFPA, 2017. *BULLETIN» Submerged Hybrid / Electric Vehicles*. [Online]
Available at: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/Code-or-topic-fact-sheets/BulletinSubmergedHybridEV.pdf>
[Geopend 2021].

NRDC, 2021. *Hydrogen Safety : Let's Clear the Air*. [Online]
Available at: <https://www.nrdc.org/experts/christian-tae/hydrogen-safety-lets-clear-air>
[Geopend 18 08 2021].

OVPro, 2019. *OV-markt is ideale kartrekker van geregisseerde laadhubs*. [Online]
Available at: <https://www.ovpro.nl/bus/2019/11/28/ov-markt-is-ideale-kartrekker-van-geregisseerde-laadhubs/>
[Geopend 4 10 2021].

OVPro, 2021. *Accu's Mercedes-Benz krijgen tweede leven als energieopslag voor trams*. [Online]
Available at: <https://www.ovpro.nl/bus/2021/06/09/accus-mercedes-benz-krijgen-tweede-leven-als-energieopslag-voor-trams/>
[Geopend 28 09 2021].

Peutz, 2020. *Busplein Centraal Station Arnhem - Risicoanalyse waterstof en onderzoek ventilatievoorzieningen en sprinklerinstallatie*, Mook (NL): Peutz.

Peutz, 2020. *Busplein Centraal Station Arnhem - Risicoanalyse waterstof en onderzoek ventilatievoorzieningen en sprinklerinstallatie*, Mook, NL: Peutz.

PGS, 2021. *PGS26 CNG en LNG: Richtlijn voor het veilig bedrijfsmatig stallen, onderhouden en repareren van motorvoertuigen*. [Online]
Available at: <https://publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/publicaties/online/pgs-26/pgs-26-2021-versie-1-0-augustus-2021>
[Geopend 28 09 2020].

Proterra, unknown. *First Response Guide - Proterra Catalyst® E2 Electric Transit Bus*. [Online]
Available at: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/Training/AFV/Emergency-Response-Guides/Proterra/Proterra-Bus-Catalyst-E2-EV-2017-2018-QRG.ashx>
[Geopend 08 juli 2021].

Provincie Utrecht, 2018. *Verbetering realisatie zero emissie busvervoer*, Utrecht: Provincie Utrecht.

Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen, 2021. *Richtlijn voor het veilig bedrijfsmatig stallen, onderhouden en repareren van motorvoertuigen*. [Online]
Available at: <https://publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/publicaties/PGS26.html>
[Geopend 17 11 2021].

Rijksoverheid, 2019. *Contouren toekomstbeeld OV 2030*. [Online]
Available at: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/openbaar-vervoer/betere->



verbindingen-openbaar-vervoer/ov-in-de-toekomst
[Geopend 1 10 2021].

RISE, 2019. *Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles*, Boras: RISE.

RIVM, 2019. *Detectiemiddelen bij brand met li-ion batterijen*, Den Haag: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM).

SAE, 2014. *Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles*, J2601/2_201409. [Online]
Available at: https://www.sae.org/standards/content/j2601/2_201409/
[Geopend 7 10 2021].

SAE, 2020a. *Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles*. [Online]
Available at: https://www.sae.org/standards/content/j2601_202005/
[Geopend 7 10 2021].

SAE, 2020b. *SAE publishes On-Route Mechanized Conductive EV Charging Systems Recommended Practices*. [Online]
Available at: <https://www.sae.org/news/2020/02/sae-j3105-promotes-safe-charging-for-buses-and-heavy-duty-vehicles>
[Geopend 1 10 2021].

Six Sigma Daily, 2020. *Six Sigma Tools: DPU, DPMO, PPM and RTY*. [Online]
Available at: <https://www.sixsigmadaily.com/dpu-dpmo-ppm-and-rt/>
[Geopend 7 12 2021].

SP Technical Research Institute of Sweden, 2017. *Risks associated with alternative fuels in road tunnels and underground garages*, Boras: SP Technical Research Institute of Sweden.

Spirka, S. & Kepkaa, M., 2015. Tests and simulations for assessment of electric buses passive safety. *Procedia Engineering*, Issue 114, pp. 338 - 345.

Sun, P., Bisschop, R., Niu, H. & Huang, X., 2020. A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. *Fire Technology*, Issue 56, pp. 1361-1410.

Sustainable bus, 2019. *Hydrogen at scale for transit. What does it mean to operate fuel cell buses?*. [Online]
Available at: <https://www.sustainable-bus.com/news/hydrogen-at-scale-for-transit-what-does-it-mean-to-operate-fuel-cell-buses/>
[Geopend 5 July 2021].

SWOV, 2016. *Touringcars en verkeersveiligheid*, Den Haag: Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid (SWOV).

SWOV, 2020. *Advies praktijkproef : Elektrische bus met waterstof-aanhanger*, Den Haag: SWOV.

Tarada, F., 2017. Safety of Innovative Vehicles in Tunnels. *Newsletter Tunnels and Tunneling*, February, pp. 37-42.



The Guardian, 2019. *Futuristic sounds to make electric buses safer hit wrong note*. [Online]
Available at: <https://www.theguardian.com/world/2019/jul/01/futuristic-sounds-to-make-electric-buses-safer-hit-wrong-note>
[Geopend 24 08 2021].

The Insight Partners, 2021. *Acoustic Vehicle Alerting System (AVAS) Market Forecast to 2028 - COVID-19 Impact and Global Analysis By Propulsion (Battery Electric Vehicle (BEV), Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV), Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV), Hybrid Electric Vehicle (HEV))*; [Online]
Available at: <https://www.theinsightpartners.com/reports/acoustic-vehicle-alerting-system-avas-market>
[Geopend 24 08 2021].

TNO, 2019. *Power to Formic Acid*, sl: TNO.

TNO, 2020. *Risico's in parkeergarages ten gevolge van elektrisch en waterstof aangedreven personenauto's - Internationale inventarisatie*, Delft: TNO.

Transdev, 2020. *Toppers van Transdev : Ben*. [Online]
Available at: <https://www.wijzijntansdev.nl/nl/over-ons/toppers-van-transdev/toppers-van-transdev-ben>
[Geopend 1 10 2021].

TU Eindhoven, 2016. *Team FAST presents scale model of car powered by formic acid*. [Online]
Available at: <https://www.tue.nl/en/news-and-events/news-overview/14-01-2016-team-fast-presents-scale-model-of-car-powered-by-formic-acid/#top>
[Geopend 24 08 2021].

UFO Battery, 2020. *What Is Lithium-ion Battery Pack?*. [Online]
Available at: <https://www.ufo-battery.com/what-is-lithium-ion-battery-pack>
[Geopend 18 09 2020].

UNECE, 2013. *Global Technical Regulation No.13 (Hydrogen and fuel cell vehicles)*. [Online]
Available at:
<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29registry/ECE-TRANS-180a13e.pdf>
[Geopend 2021].

UNECE, 2018. *Addendum 20: Global Technical Regulation No. 20 : Global Technical Regulation on the Electric Vehicle Safety (EVS)*. [Online]
Available at:
<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29registry/ECE-TRANS-180a20e.pdf>
[Geopend 8 10 2021].

UNECE, 2018. *Global Technical Regulation No. 20 (Electric Vehicle Safety (EVS))*. [Online]
Available at:
<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29registry/ECE-TRANS-180a20e.pdf>
[Geopend 2021].



US department of Energy, unknown. *Hydrogen Safety and Event Response - Subcommittee Report*. [Online]

Available at: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac_hser_report_6-17.pdf
[Geopend 08 Juli 2021].

Van Veen, N. & Koppen, A., 2020. *Emergency responses in smoke from Li-ion batteries: FIVE 2020*, Utrecht: National Institute for Public Health and the Environment & University Medical Center Utrecht, National Poisons Information Center Utrecht.

Waterstofnet, 2021. *General Hydrogen Safety Facts*. [Online]

Available at: <https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/safety-framework/general-hydrogen-safety-facts>
[Geopend 30 06 2021].

Willstrand, O. et al., 2020. *Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles*, sl: RISE Research Institutes of Sweden.

ZE Bus, 2020. *De staat van waterstof in het openbaar busvervoer*, sl: Kennisplatform Zero Emissie Bus.

A Overzicht partijen in begeleidingsgroep

De begeleidingsgroep bestond uit leden van de bedrijven of organisaties in Tabel 15.

Tabel 15 - Overzicht deelnemers begeleidingsgroep

Naam bedrijf of organisatie
CROW (opdrachtgever)
Rijkswaterstaat
RvO namens de NAL werkgroep veiligheid
IFV
RDW
DOVA
ElaadNL
Provincie Utrecht
NEN

B Studie veiligheid en elektrische personenauto's (2020)

In deze bijlage schetsen we de context van een eerder onderzoek van CE Delft naar de veiligheidsaspecten van elektrische personenauto's. We bespreken de conclusies die uit de studie naar de veiligheid van elektrische personenauto's naar voren zijn gekomen (CE Delft, 2020).

In de studie *Veiligheid en elektrische personenauto's* is gekeken naar batterijelektrische personenauto's. De conclusie van het onderzoek is dat elektrische auto's over het geheel genomen geen hoger veiligheidsrisico met zich meebrengen dan fossiel-aangedreven (oftewel fossiel-aangedreven) auto's. Veiligheidsrisico's die gelden voor elektrische auto's, gelden in veel gevallen ook voor fossiel-aangedreven auto's. Er is bovendien veel (internationale en nationale) regelgeving in relatie tot veiligheid, waar zowel fossiel-aangedreven als elektrische auto's aan moeten voldoen.

Veiligheidsrisico's die uit het onderzoek naar voren zijn gekomen, zijn: het optreden van thermal runaway (een proces waarbij door verhoogde temperatuur of interne weerstand in de cellen van accupakketten brand kan ontstaan, waarna toxische gassen vrijkomen) en autobranden in parkeergarages (geldt voor zowel elektrische als fossiel-aangedreven auto's). Het daadwerkelijke risico is het product van de kans dat het optreedt en het effect als het optreedt. De literatuur en praktijktesten wijzen niet op een hoge kans van optreden van de genoemde veiligheidsrisico's. Ook zijn er momenteel geen aanwijzingen dat de effecten substantieel groter zijn. Statistieken en praktijkdata moeten in de toekomst uitwijzen of dit beeld overeenkomt met de praktijk.

Het optreden van een brand (als gevolg van een thermal runaway) brengt niet zozeer een hoger veiligheidsrisico met zich mee ten opzichte van een fossiel-aangedreven auto, maar vraagt wel om een andere werkwijze in het incidentmanagement. Specifiek geldt dit voor brand in een parkeergarage. De oorzaken hiervan zijn: accubranden kunnen lang voortduren, een accu kan opnieuw ontbranden en het is niet altijd direct duidelijk waar het accupakket zich in de auto bevindt. De gevolgen hiervan zijn dat er veel bluswater nodig is om brand te bestrijden, dat het wegslepen moeilijk is en eerst moet worden uitgezocht waar het accupakket zich bevindt. Daarnaast zijn er nog openstaande vragen die met name te maken hebben met veroudering van het accupakket en de betrouwbaarheid van het systeem dat wisselingen in spanning en temperatuur in het accupakket monitort door veroudering.

De vragen over mogelijke veiligheidsrisico's bij elektrische auto's in de media en politiek zijn deels ook geuit in de interviews die wij hebben afgenomen. Alhoewel wij op basis van de beschikbare kennis en geldende regelgeving dus concluderen dat de daadwerkelijke extra risico's van elektrische auto's gering zijn, kan aanvullend experimenteel of praktijkonderzoek mogelijk een deel van de vragen en zorgen die er leven, wegnemen.

C Overzicht geïnterviewde partijen

Tabel 16 - Geïnterviewde partijen

Interview	Geïnterviewden
Concessiehouders/Vervoerders	RET
	HTM
Opdrachtgevers	Regio Oost (Flevoland, Overijssel, Gelderland)
	Provincie Zuid-Holland
	MRDH
Verkeersmanagement	Rijkswaterstaat
Gemeenten	Eindhoven
	Rotterdam
Incidentmanagement	IFV
	Brandweer
	Vereniging van bergers
Laadinfrastructuur	ElaadNL
	ABB
Fabrikanten	VDL
	Ebusco

D Overzicht interviewvragen

In deze bijlage staat de lijst met interviewvragen weergegeven zoals gecommuniceerd naar de geïnterviewde partijen. Dit is een uitgebreide vragenlijst met zowel algemene als specialistische vragen over verschillende onderwerpen. Het is dan ook niet het geval dat alle vragen in elk interview behandeld waren. Per interview is vooraf gecommuniceerd welke vragen relevant zijn.

Algemene vragen

- Met welke aspecten rondom veiligheid van ZE-bussen houden jullie je bezig?
- Welke specifieke voertuigveiligheidsaspecten voor ZE-bussen zien jullie? Hoe verhouden deze zich tot bussen aangedreven door bijvoorbeeld diesel en aardgas?
- ZE-bussen gaan vijftien jaar mee. Bij het aflopen van contracten (concessies) na tien jaar: hoe zijn de verantwoordelijkheden geregeld ten aanzien van veiligheidsaspecten? Is er behoefte aan bijvoorbeeld een keuring?
- Tegen welke uitdagingen lopen jullie aan bij ZE-bussen in relatie tot veiligheid?
- [Aan het eind van het interview] Welke aanvullende informatie willen jullie ons nog meegeven?

Specifieke vragen per thema

Cluster 1: Voertuigveiligheid, geluid, te water geraking

- Algemeen:
 - Is de voertuigveiligheid van ZE-bussen vergelijkbaar met andersoortige bussen?
 - Is er aanvullende wet- en regelgeving is noodzakelijk/in ontwikkeling op het gebied van voertuigveiligheid van ZE-bussen?
 - Hoe wordt veiligheid meegenomen in de aanbestedingen?
 - Hoe is de provincie hierbij betrokken?
 - Hoe werkt een samenwerking tussen provincies/metropolen in de praktijk? Worden veiligheidsaspecten gezamenlijk benaderd?
 - Welke veiligheidsaspecten ten aanzien van te water geraking van ZE-bussen zijn bij jullie bekend? Hoe verhouden deze zich tot veiligheidsaspecten van diesel-/aardgas-aangedreven bussen?
 - Ervaren jullie de afwezigheid van geluid bij lage snelheden als een veiligheidsrisico?
 - Hoe gaat het afstellen van het AVAS-systeem in zijn werk? Doet de fabrikant dit of kan bijvoorbeeld een concessiebeheerder dat zelf doen?
 - Hoe wordt een chauffeur geïnformeerd over een mogelijke storing/defect aan de bus? Wordt de centrale ook (direct) geïnformeerd?
 - Wordt de voertuigstatus ten allen tijden gemonitord? Of alleen op het depot?
- Waterstof:
 - In hoeverre worden er in FCEV-bussen sensoren toegepast om lekkage van waterstof te detecteren? Zijn deze toegepast in de bus zelf of in de tank/het toevoersysteem?

Cluster 2: Batterij en tank, onderhoud en veiligheid

- Batterij en tank:
 - Hoe wordt vastgesteld of de tank/batterij nog goed en veilig werkt?
 - Is er een verschil in veiligheid bij plaatsing van het accupakket op het dak of onder de vloer?
 - Welk type waterstoftank wordt toegepast in ZE-bussen? (Bijvoorbeeld welke druk?)
 - Zijn er specifieke veiligheidsaspecten bij verschillende typen tanks? Zo ja, welke?
- Onderhoud en veiligheid:
 - Wie voert het onderhoud aan de bussen uit? Indien binnenshuis:
 - Krijgen monteurs aparte trainingen en opleidingen voor onderhoud aan ZE-bussen?
 - Zijn er handleidingen en standaarden specifiek voor het onderhoud aan ZE-bussen?
 - Is er een verschil met opleidingen voor monteurs van bussen op diesel of aardgas?

Cluster 3: Brandveiligheid, incidentmanagement en besloten ruimtes

- Algemeen:
 - Hoe is de provincie betrokken bij de afhandeling van incidenten?
- Brandveiligheid:
 - Zijn er andere protocollen/richtlijnen voor waarschuwen en of omgang met publiek (bijvoorbeeld veiligheidsafstand) bij brand met ZE-bussen?
 - Wordt een ZE-bus op een andere manier geblust dan bijvoorbeeld een (cng-)bus?
 - Zijn de bestaande hulpmiddelen (blussen/bescherming/etc.) bij het blussen van brand van ZE-bussen voldoende of zijn aanvullende of aangepaste middelen nodig?
- Incidentmanagement:
 - Zijn er andere protocollen/richtlijnen voor waarschuwen en/of omgang met publiek bij incidenten met ZE-bussen?
 - Worden er vanuit de provincie richtlijnen gesteld tijdens de aanbesteding?
 - Hoe wordt veiligheid meegenomen in de aanbesteding?
 - Worden buschauffeurs of ander personeel voorbereid op incidenten? Zo ja, hoe? Zijn er trainingen?
 - Is er een database (nationaal, internationaal) met registraties van incidenten of is deze in ontwikkeling? Is er behoefte aan?
 - Worden passagiers voorzien van informatie in het geval van incidenten (denk aan instructies in vliegtuigen)? Verschil batterijelektrisch en waterstof?
 - Is de keten van incidentmanagement anders/ingewikkelder bij ZE-bussen ten opzichte van bestaande (cng-)bussen?
 - Wat is het protocol voor een bus met lege accu of tank? Verschilt dit ten opzichte van een dieselbus?
 - Laad- en tankinfra:
 - Hoe wordt een mogelijk gevaarlijke situatie tijdens het laden/tanken doorgegeven aan de politie/brandweer? Hoe wordt hiernaar gehandeld?
 - Zijn er protocollen aanwezig voor de bestrijding van incidenten op laad-/tank-infrastructuur? (Politie/brandweer/ambulance/bergers?)
 - Zijn er voorbeelden van incidenten met laad- en tankinfrastructuur?
 - > Wat is jullie ervaring met laadincidenten? Komen deze voor, en zo ja, hoe frequent?
 - > Hoe is er toen gehandeld?

- Berging:
 - Welke uitdagingen zijn er omtrent het bergen van ZE-bussen?
 - Is er aangepast advies voor de berging van ZE-bussen?
 - Weten bergers hoe een elektrische bus gesleept moet worden?
 - Welke middelen zijn er voor het wegslepen en afhandelen van verbrande ZE-bussen?
 - Zijn de beschikbare middelen voor het bergen van ZE-bussen geschikt?
- Besloten ruimtes:
 - Stallen:
 - Wordt er rekening gehouden bij het stallen/laden van bussen bij het verlenen van een omgevingsvergunning?
 - Is er een nieuwe of een aanpassing op de bestaande omgevingsvergunning nodig bij de overstap naar ZE-bussen?
 - Op welke manier houdt de provincie rekening met de veiligheid van ZE-bussen?
 - Welke veiligheidsaspecten spelen een rol bij het stallen van ZE-bussen in een remise?
 - Welke veiligheidsaspecten spelen een rol bij het laden van ZE-bussen in een remise?
 - » Welke veiligheidsaspecten spelen bij de verschillende manieren van laden? Kabel, pantograaf, inductie, etc.
 - Hoe is de perceptie van veiligheid?
 - In het geval van een incident met een ZE-bus; hoe wordt er omgegaan met veilige evacuatie? Wat ontbreekt er in protocollen?
 - Zijn er aanvullende sensoren of maatregelen nodig om de veiligheid van stalling van ZE-bussen te waarborgen?
 - Tunnels:
 - Welke veiligheidsaspecten spelen een rol bij ZE-bussen in relatie tot tunnelveiligheid?
 - » Hoe kijkt de provincie aan tegen de inzet van ZE-bussen in tunnels?
 - » Met welke partijen zit de provincie om de tafel bij deze beslissingen?
 - Welke middelen zijn toereikend om tunnelveiligheid te monitoren?
 - Zijn er aanvullende sensoren of maatregelen nodig om de tunnelveiligheid te waarborgen?
 - Hoe is de perceptie van veiligheid met ZE-bussen in tunnels? Welke zorgen zijn er eventueel bij tunnelbeheerders?
 - Welk advies/welke richtlijn wordt aan de chauffeur gegeven in geval van een waarschuwing? Voor de tunnel stoppen bij waarschuwing of door tunnel rijden tot rood alarmlicht? Wat zijn mogelijkheden om het voertuig veilig te stellen?
 - Moeten bestaande tunnels worden aangepast voor veiligheid van ZE-bussen?
 - Zijn er protocollen/opleidingen voor tunnelpersoneel/-beheer bij incidenten met ZE-bussen in tunnels?
 - In het geval van een incident met een ZE-bus; hoe wordt er omgegaan met veilige evacuatie uit een tunnel? Wat ontbreekt er in protocollen?

Cluster 4: Laad- en tankinfrastructuur

- Algemeen:
 - Wordt er gestreefd naar standaardisatie van laadsystemen?
 - Geldt dit ook voor veiligheidseisen van laadsystemen, zowel in normen maar ook in landelijke/Europese eisen?
 - Geldt dit bijvoorbeeld voor knooppunten, waar meerdere concessies (lijnen) samenkomen?

- Waar wordt er geladen? Alleen op depot of ook aan het einde van de lijn of onderweg (op niet-eindpunthalte)?
 - Welke veiligheidssystemen dienen geïnstalleerd te zijn? (Arbo, brandveiligheid, laad-/tanksystemen, etc.?)
 - Zijn er ondersteunende systemen of materialen benodigd voor het laden/tanken? (Extra ventilatie, handschoenen, etc.?)
 - Zijn er verschillen in keuzes voor pantografen (boven/beneden)?
 - Hoe wordt de veiligheid geborgd van veiligheidssystemen (cybersecurity)?
 - Wat voor netaansluiting wordt of is er aangelegd (laag-, midden-, hoogspanning, en welke veiligheidssystemen zijn opgenomen voor overbelasting van het net)?
 - Hoe verloopt de communicatie tussen bus en laadinfra (in geval van mogelijke calamiteit)? Is dit hetzelfde als voor auto's?
 - Zijn hier eisen/richtlijnen voor?
 - Zijn er eisen/richtlijnen voor het laadproces?
 - Is er een centrale die de status van de laadinfra bijhoudt? Hoe wordt de centrale/chauffeur geïnformeerd over een mogelijk defect met de laadvoorziening? (Interactie bus - infra; IEC61851, IEC15118.)
 - Welke systemen ondersteunen de chauffeur bij het opstellen van de bus voor opladen?
 - Waar wordt er (waterstof) getankt, en wie is er verantwoordelijk voor de installatie/onderhoud van het vulstation?
 - Wie verzorgt het tanken van de bussen, wordt dit door externen of eigen personeel gedaan (opleiding/training)?
 - Is er automatisering aanwezig in laadsystemen (laadarm, systemen)? Hoe wordt dit gemonitord en beheerd?
 - Welke veiligheidsaspecten spelen een rol bij het onderhoud aan de laad- en tankinfrastructuur?
- Depots:
- Op welke terreinen dienen bestaande depots aangepast te worden voor laden/tanken?
 - Welke veiligheidsmaatregelen worden er nu toegepast bij het laden of tanken in depots/remises? Zijn deze anders dan bij bussen die rijden op diesel/aardgas?
 - Met hoeveel kW wordt er geladen op depot, en eventueel onderweg?
 - Specifiek als er in remises wordt gewerkt met laadkabels: hoe groot is het aanrijdrisico? (Bus rijdt tegen stekker van andere bus aan.)
- Buiten depots:
- Welke systemen zijn er benodigd voor laden buiten de depots? (Wifi, netwerk, kabels, etc.)
 - Welke omgevingsfactoren in relatie tot veiligheid worden meegenomen voor het aanleggen van laad-/tankinfra? (Niet in de buurt van bomen, niet overdekt, geen aanrakingsgevaar, etc.)
 - Op welke manier heeft de provincie hier inspraak op?
 - Hoe wordt een laadincident bestreden buiten het depot, gaat dit on-board bij het voertuig, is er een centrale die de aansluiting kan onderbreken?
- Laadmethoden:
- Welke laad-/tanksystemen worden gebruikt op de locatie(s)? (Denk aan stekker/inductie/pantograaf, en tankstations of eigen tankvoorzieningen.)
 - Blijven passagiers in de bus zitten tijdens opportunityladen? Zien jullie hierbij gevaren voor de passagiers, en zijn hier veiligheidsprotocollen voor?

E Overzicht incidenten

In Tabel 17 staat een overzicht van incidenten met ZE-bussen die in dit onderzoek zijn meegenomen. Dit overzicht is geen uitputtende lijst van incidenten en is actueel ten tijde van dit onderzoek.

Tabel 17 - Overzicht incidenten met ZE-bussen

Incident	Locatie (soort)	Gebeurtenis	Jaar	Oorzaak	Bijzonderheden
Remise Haarlem	Stallingsplek	Brand in een bus ontstaan, overgeslagen, daardoor vier splinternieuwe batterij-elektrische bussen uitgebrand.	2020	Niet duidelijk uit berichten; ook niets vermeld in interview Ebusco (daar waren de bussen van en splinternieuw). Uit berichtgeving komt wel naar voren dat de brand niet is ontstaan door brandstichting.	-
Groningen	Weg	Technische storing met FCEV waarbij de brandweer uitrukke.	2021	Tijdens het tanken maakte de bus een hoge pieptoon. Hiervan is een melding gemaakt. Het betrof een elektrische storing in de bus.	De meldkamer heeft aangegeven het lastig te vinden hoe (onder welk onderwerp) het incident aangemaakt moest worden. Er was geen keuze beschikbaar om aan te geven dat het een waterstof bus betreft. De melding is daarom aangemaakt onder HV en niet IBGS. Hierdoor dus ook de uitruk van de brandweer. Ervaringen dienen als input voor werkpakket incidentmanagement onder het WWIP voor het optimaliseren van de aandachtkaarten.
Edam	Laadplek (pantograaf)	Brand	2019	Kortsluiting	Laden ging door tijdens de brand, BMS deed zijn werk niet correct(?)
China	Open lucht remise/parkeerplaats	Brand	2020	Onbekend. De brand is plotseling ontstaan in één van de bussen.	Eerst rook en explosie te zien bij bussen. De snelheid waarmee de bus is uitgebrand (6minuten) is opvallend. De brand is overgeslagen naar drie andere bussen, deze zijn uiteindelijk uitgebrand. Het uitbranden van een vijfde bus werd voorkomen door de brandweer die de branden binnen 20 minuten doofden
Duitsland (Stuttgart, maar ook Dusseldorf en Hamburg)	Remise (overdekt)	25 bussen uitgebrand, waaronder e-bussen	2021	De eerste bevinding uit het onderzoek is dat de brand is ontstaan bij het opladen van een van de bussen.	Te grote schade om met zekerheid de oorzaak van de brand vast te stellen.
Doetinchem	Garage	Brand met waterstofbus, overgeslagen naar remise waar ook een dieselbus was gestald.	2021	Onduidelijk, toedracht wordt nog onderzocht.	Het onderzoek naar de toedracht is onlangs gestart. Zicht op een mogelijke opleverdatum van een eindrapport is er niet. Veiligheidsregio's zijn al in beraad hoe ze van het incident kunnen leren in de vorm van een napraat sessie.