



BETTER SHIPS, BLUE OCEANS

Elektrische autobranden

Brandrisico's door- en maatregelen voor het vervoer van elektrische auto's aan boord van autoschepen

Rapport nr. : 77001-6-MO-rev.1.1-voor publicatie
Datum : 31 juli 2025
Versie : 1.1
Eindrapport

Elektrische autobranden

Brandrisico's door- en maatregelen voor het vervoer van elektrische auto's aan boord van autoschepen

Opdrachtgever : Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Gerapporteerd door :

Paraaf management :

| Versie | Datum | Status | Gecontroleerd door |
|--------|---------------|-----------------------------|--------------------|
| 0.1 | december 2024 | Concept | |
| 1.0 | januari 2025 | Concept | |
| 1.0 | april 2025 | Eindrapport | |
| 1.1 | 31 juli 2025 | Eindrapport voor publicatie | |

SAMENVATTING

In de nacht van 25 op 26 juli 2023 ontstond brand aan boord van het autoschip Fremantle Highway. De bemanning kon niets meer uitrichten en evacueren was noodzakelijk. Tijdens de evacuatie kwam één bemanningslid te overlijden. Het schip dreef vervolgens stuurloos en brandend rond. Pas na enkele dagen was het vuur dermate gedoofd dat bergers het schip naar de Eemshaven konden slepen.

Aan boord van het autoschip bevonden zich 498 elektrische en 3784 conventionele auto's. Tijdens het leeghalen van het schip begonnen sommige elektrische auto's weer te branden. Hoewel de ware toedracht (nog) niet bekend is, ontstond de vraag of elektrische auto's meer brandgevaar veroorzaken op autoschepen en hoe deze gevaren zijn weg te nemen.

Elektrische auto's definiëren we in dit onderzoek als volledig elektrische auto's en plug-inhybride auto's, dat wil zeggen auto's die met een stekker zijn op te laden. Hier is een lithium-ion-batterij het unieke kenmerk. Deze voorziet energie voor de aandrijving van de auto. Een elektrische autobrand is een brand waarbij die batterij betrokken is bij de brand.

Het doel van dit onderzoek is om een duiding te geven aan bestaande zorgen omtrent elektrische autobranden aan boord van autoschepen. Hiervoor is het gevaar en het risico van elektrische autobranden aan boord van autoschepen in kaart gebracht, net als werkwijzen voor het voorkomen en bestrijden van dit type brand. Aan de hand hiervan zijn aanbevelingen gedaan.

Aanvankelijk was het de bedoeling om het onderzoek uit te voeren aan de hand van interviews en workshops met deskundigen. Er zijn interviews uitgevoerd met een vertegenwoordiger van de Maritime Incident Response Group (MIRG) en met werknemers van de veerbootrederijen Doeksen en Stena Line. Dat leverde onvoldoende kennis en informatie op voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen. Daarom is er voor gekozen om het onderzoek uit te voeren als een literatuurstudie. Hieruit kwam een brede selectie aan literatuur naar voren. Europese projecten en recente overzichtsstudies zijn geselecteerd en als leidraad genomen.

Uit de gevonden informatie blijkt dat het maximale brandvermogen en totale vuurlast van een elektrische autobrand en een brand in een conventionele auto vergelijkbaar zijn. Daarnaast blijkt dat hoe meer energie opgeslagen is in de batterij, hoe meer energie de batterij kan toevoegen aan de brand. Het verloop van een elektrische autobrand is afhankelijk van hoe een brand ontstaat of welke bron deze veroorzaakt. Het brandproces in een elektrische auto kan begonnen zijn lang voordat er daadwerkelijk vuur zichtbaar is. Steekvlammen, explosies en giftig rook kenmerken de elektrische autobrand. Steekvlammen en explosies kunnen een brand snel verspreiden. Een lithium-ion-batterij voedt zijn eigen brand met zuurstof, is moeilijk te blussen en kan na verloop van tijd weer oplaaen.

Elektrische autobranden komen tot dusver in absolute aantallen niet vaker, maar juist minder vaak voor dan conventionele autobranden. Dit geldt zowel op land als in het autoruim van een autoschip. De houdbaarheid van deze statistieken is twijfelachtig omdat het aandeel elektrische auto's hand over hand toeneemt, zowel in nieuwstaat als tweedehands, en er nog veel onbekend is over hoe batterijen verouderen. Wanneer een elektrische auto vlam vat, is de oorzaak vaak gelegen in eerder opgelopen (botsing)schade of in oplaadactiviteiten.

Een manier om elektrische autobranden aan boord van autoschepen te voorkomen is het weren van risicovoertuigen. Dit zijn auto's die zichtbare schade hebben, problemen melden op het dashboard, recent gerepareerd zijn of anderszins niet veilig kunnen rijden. Ook auto's met een batterijlading boven de 50% hebben een verhoogd risico. Het aan boord opladen van elektrische auto's verhoogt het brandrisico ook.

In geval van een elektrische autobrand is het belangrijk dat brandbestrijders de brand snel als zodanig herkennen, gezien de specifieke uitdagingen van een lithium-ion-batterijbrand. Voor het herkennen is op lithium-ion-batterijbrand gerichte detectieapparatuur vereist. Ook het trainen van scheepspersoneel is nodig om visueel en/of auditief de voortekenen van een batterijbrand te leren herkennen. Dit kan bijvoorbeeld door het opnemen van een specifieke module in de STCW-trainingen *Basic Safety* en *Advanced Fire Fighting*. Procedures aan boord kunnen ook helpen, zoals het markeren van elektrische auto's en/of door deze auto's in speciale ruimtes te plaatsen.

In geval van brand is veel water de beste remedie. Elektrische auto's dienen zo geplaatst te zijn dat deze recht onder en/of boven een (deluge-)sprinklersysteem staan. Waterafvoersystemen moeten navenant zijn ingericht, zodat de scheepsstabiliteit niet in het geding komt. Voorzichtigheid is geboden met andere systemen, zoals branddekens of lanssen, omdat deze specialisme vereisen en vaak moeilijk te gebruiken zijn in volle laadruimten. Deze middelen kunnen wel helpen, mits de situatie zich ervoor leent en met inachtneming van de juiste (veiligheids)procedures en trainingen.

| INHOUDSOPGAVE | PAGINA |
|---|---------------|
| SAMENVATTING..... | II |
| OVERZICHT VAN TABELLEN EN FIGUREN..... | V |
| 1 INTRODUCTIE..... | 1 |
| 1.1 Brandrisico's van elektrische auto's op autoschepen | 1 |
| 1.2 Onderzoeksvragen | 2 |
| 1.3 Scope en definiëring..... | 2 |
| 1.4 Leeswijzer..... | 3 |
| 2 METHODE | 4 |
| 2.1 Literatuuronderzoek..... | 4 |
| 2.2 Geselecteerde literatuur | 4 |
| 2.2.1 Definiëring van eerste sleutelbegrippen en zoekterm..... | 5 |
| 2.2.2 Vooronderzoek..... | 5 |
| 2.2.2.1 Google Scholar, review-artikelen..... | 5 |
| 2.2.2.2 OpenAIRE en Science.gov | 6 |
| 2.2.2.3 Tweede iteratie | 7 |
| 3 BEVINDINGEN | 8 |
| 3.1 Wetgeving, richtlijnen, voorschriften en standaarden | 8 |
| 3.1.1 Wet- en regelgeving..... | 8 |
| 3.1.2 Klassebureaus | 9 |
| 3.1.3 Maritieme sector..... | 10 |
| 3.2 Beschrijving Europese projecten: Firesafe I & II, LASH FIRE..... | 10 |
| 3.3 Brandeigenschappen van elektrische auto's..... | 11 |
| 3.3.1 Introductie brandeigenschappen..... | 11 |
| 3.3.2 Brandbaarheid van de elektrische auto tegenover een reguliere brandstofauto | 12 |
| 3.3.2.1 Brandproeven op ware schaal..... | 12 |
| 3.3.2.2 Overzichtsstudies en onderzoeksproducten over brandbaarheid | 17 |
| 3.4 Brandrisico's | 19 |
| 3.4.1 Frequentie van brand aan boord van autoschepen | 19 |
| 3.4.2 Brandrisico's van elektrische auto's | 21 |
| 3.5 Preventieve en mitigerende maatregelen..... | 23 |
| 3.5.1 Oorzaak van brand aan boord van autoschepen..... | 24 |
| 3.5.2 ELBAS-project..... | 26 |
| 3.5.3 Firesafe I & II- en LASH FIRE-projecten..... | 27 |
| 3.5.4 Aanvullende bronnen | 31 |
| 4 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN | 32 |
| 4.1 Conclusies | 32 |
| 4.2 Aanbevelingen | 34 |
| REFERENTIES..... | 36 |

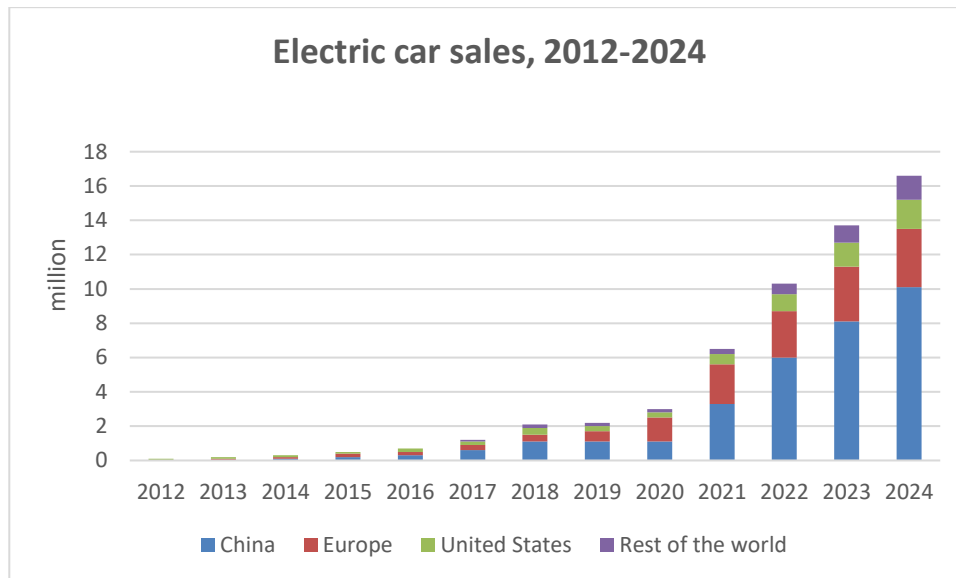
OVERZICHT VAN TABELLEN EN FIGUREN

| | | |
|------------|--|----|
| Tabel 1-1 | Soorten elektrische auto's..... | 2 |
| Tabel 1-2 | Soorten autoschepen..... | 3 |
| Tabel 3-1 | Globaal overzicht van wetgeving, richtlijnen, voorschriften en standaarden met betrekking tot elektrische auto's op autoschepen..... | 8 |
| Tabel 3-2 | LASH FIRE-werkgroepen..... | 10 |
| Tabel 3-3 | Risico analyses. | 19 |
| Tabel 3-4 | Brandfrequentie ro-ro-ruimten LASHFIRE D04.2 in de periode 2002-2018..... | 20 |
| Tabel 3-5 | Containerbrand versus voertuigbrand..... | 20 |
| Tabel 3-6 | Belangrijkste oorzaken van brand in enclosed ro-ro spaces [Ref 24.]..... | 21 |
| Tabel 3-7 | Risicofactoren elektrische auto [Ref 26.]..... | 22 |
| Tabel 3-8 | Voorstel STCW Advanced Firefighting..... | 30 |
| | | |
| Figuur 1-1 | Verkoop elektrische auto's, 2012-2024 [Ref 2.]..... | 1 |
| Figuur 1-2 | De verschillende soorten elektrische auto's [Ref 1.]..... | 3 |
| Figuur 2-1 | Sleutelbegrippen en zoekterm..... | 5 |
| Figuur 2-2 | Resultaten Google Scholar, review-artikelen..... | 6 |
| Figuur 2-3 | Resultaten OpenAIRE en Science.gov..... | 6 |
| Figuur 3-1 | Brandeigenschappen elektrische auto's aan boord van autoschepen..... | 11 |
| Figuur 3-2 | Samenvatting van de testresultaten uit het literatuuronderzoek van werkgroep 10.4 [Ref 11.]..... | 14 |
| Figuur 3-3 | Brandontwikkeling tussen twee voertuigen [Ref 16.]..... | 15 |
| Figuur 3-4 | HRR en THR elektrisch (BEV) en conventioneel (ICEV) [Ref 20.]..... | 17 |
| Figuur 3-5 | Verwachte toename elektrische autobranden Australië [Ref 28.]..... | 22 |
| Figuur 3-6 | Statistieken China 2016-2021 [Ref 26.]..... | 23 |
| Figuur 3-7 | Firesafe I: Fault Tree Risk Model gebaseerd op 140 ongevallen tussen 1994 – 2016 | 24 |
| Figuur 3-8 | AcciMap [23]..... | 25 |

1 INTRODUCTIE

1.1 Brandrisico's van elektrische auto's op autoschepen

Afgelopen jaren is het aantal en percentage elektrische auto's sterk toegenomen. De verwachting is dat dit blijft toenemen. Voor 2050 is de raming wereldwijd een aanwezigheid van 300 miljoen elektrische auto's [Ref 1.].



Figuur 1-1 Verkoop elektrische auto's, 2012-2024 [Ref 2.]

Dit maakt een toename van het aantal scheepsbewegingen van autoschepen met elektrische auto's aan boord aannemelijk. BYD, een Chinese fabrikant van elektrische auto's, heeft begin 2024 een eigen schip in gebruik genomen voor het exporteren van nieuwe auto's, met de intentie meer schepen toe te voegen aan haar vloot [Ref 3.].

Elektrische auto's verschillen van traditionele, met brandstofmotor aangedreven auto's. De energie voor de aandrijving komt bij elektrische auto's voornamelijk uit de lithium-ion-batterij, en minder tot geen uit brandstof. Een lithium-ion-batterij heeft in vergelijking met benzine en diesel andere brandeigenschappen.

In de nacht van 25 op 26 juli 2023 ontstond ten noorden van Ameland brand in het autoschip de Fremantle Highway. Het vuur verspreidde zich over het schip waardoor evacuatie noodzakelijk werd. Bij de evacuatie overleed één bemanningslid. 498 van de 3784 (nieuwe) auto's aan boord waren elektrisch. Vlak na het ongeval rees het vermoeden dat de brand was ontstaan in een elektrische auto [Ref 4.] Hoewel dit later weer in twijfel werd getrokken [Ref 5.] is de ware toedracht bij schrijven van dit rapport nog niet bekend en/of gepubliceerd.

Kortom, de toename van scheepvaartverkeer waarbij de elektrische auto een deel de van lading uitmaakt, de typische brandeigenschappen van die auto en in het licht van een recent en relevant ongeval, geven aanleiding tot de onder 1.2 gegeven onderzoeksvragen.

1.2 Onderzoeksvragen

1. Wat zijn de precieze brandeigenschappen van de elektrische auto, en in welke mate verschillen deze van de conventionele, met fossiele brandstof aangedreven auto?

Het antwoord op deze vraag gaat onder andere over de heftigheid, de duur en de hitte-uitstraling van een elektrische autobrand in vergelijking met een conventionele autobrand. Het doel van deze vraag is om zicht te krijgen op het eventuele verschil in brandeigenschappen. Dit dient als uitgangspunt en legitimatie voor (de noodzaak van) preventieve en mitigerende maatregelen.

2. Wat zijn de kansen op brand bij het vervoer van een elektrische auto in vergelijking met een conventionele, met fossiele brandstoffen aangedreven auto aan boord van een autoschip?

Het antwoord op deze vraag geeft aan hoe groot de kans op een elektrische autobrand is in vergelijking met een conventionele autobrand aan boord van een autoschip. In de eerste plaats is het ontstaansrisico van de brand in de elektrische auto onderwerp van onderzoek. Het doel is te komen tot een risico-inschatting, hetgeen de eventuele noodzaak weergeeft preventieve maatregelen exclusief voor elektrische autobranden te formuleren en toe te passen. Bij mitigerende maatregelen is vervolgens een onderscheid te maken tussen de elektrische auto als oorsprong van de brand, of wanneer de brand overslaat op de elektrische auto.

3. Welke preventieve en mitigerende maatregelen kunnen het beste genomen worden om de kans op, en het gevolg van brand door een elektrische auto aan boord van een autoschip zoveel mogelijk te beperken?

Het doel van deze vraag is het geven van oplossingsrichtingen voor het voorkomen van en het effectief bestrijden van elektrische autobranden aan boord van autoschepen.

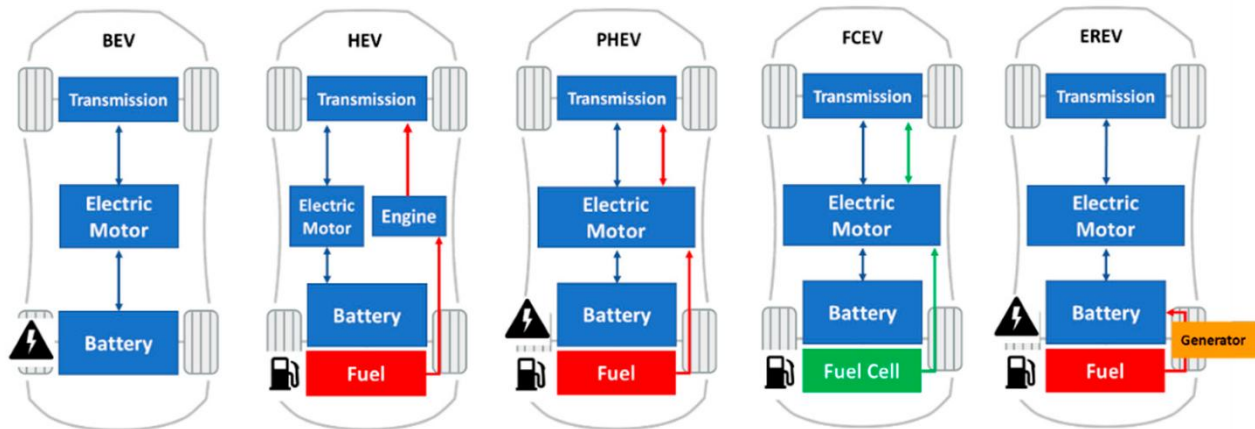
1.3 Scope en definiëring

‘Elektrische auto’ en ‘autoschip’ zijn beide overkoepelende begrippen. Een elektrische auto valt zelf onder het containerbegrip alternatieve brandstofauto, waar ook bijvoorbeeld waterstofauto’s en LPG-auto’s onder vallen.

Tabel 1-1 Soorten elektrische auto’s

| Nederlandse term | Engelse Term | In dit rapport gebruikte afkorting: |
|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Elektrische auto | Electric Vehicle | EV |
| Volledig elektrische auto | Battery Electric Vehicle | BEV |
| Elektrisch-hybride auto | Hybrid Electric Vehicle | HEV |
| Plug-inhybride auto | Plug-in Hybrid Electric Vehicle | PHEV |
| Brandstofcelauto | Fuel Cell Electric Vehicle | FCEV |
| Elektrische auto met range extender | Extended Range Electric Vehicle | EREV |

Dit rapport definieert *elektrische auto* als iedere auto die voor een belangrijk deel voorstuwing haalt uit een elektrische aandrijflijn, met uitzondering van de elektrisch-hybride auto en de brandstofcelauto. Kortom, het gaat in dit onderzoek om alle elektrische auto’s waar een stekker in gaat. De in dit rapport gebruikte termen ‘normale-’, ‘traditionele-’, ‘conventionele-’ of ‘reguliere-’ brandstofauto beschrijven alle auto’s behalve de elektrische auto.



Figuur 1-2 De verschillende soorten elektrische auto's [Ref 1.]

Er zijn veel schepen die elektrische auto's kunnen vervoeren. Voorbeelden zijn: veerboten, een binnenvaartschip met de eigen auto op het achterdek, of algemene ladingschepen met ruimte over in één van de ruimen. Voorliggend onderzoek beperkt zich tot roll-on-roll-off schepen (ro-ro-schepen), waarbij auto's rijdend via een klep aan boord kunnen. Veerboten die niet aan die condities voldoen vallen buiten de scope van het onderzoek. Binnen deze beperking is bovendien uitsluitend gericht op zeeгаande ro-ro-schepen, waardoor binnenvaart en veerdiensten op binnenwateren niet zijn meegenomen.

Tabel 1-2 Soorten autoschepen

| Nederlandse term | Engelse Term | In dit rapport gebruikte afkorting: |
|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| Autotransportschip | Pure Car Carrier | PCC |
| Auto- en vrachtwagentransportschip | Pure Car and Truck Carrier | PCTC |
| Ro-ro-schip | Roll-on/Roll-off | RORO |
| Veerboot, ro-ro-passagiersschip | Ro-ro passenger | ROPAX |

Op deze autoschepen zijn er verschillende soorten dekken. Er is onderscheid te maken tussen een open, een gesloten en een aan weer blootgesteld ro-ro-dek. Door bijvoorbeeld verschillen in ventilatie, vaste brandblusinstallaties, en hoe dicht auto's op elkaar geplaatst zijn, ontwikkeld brand zich in deze ruimten niet overal hetzelfde. Dit geeft vooral een noodzaak voor het uitsplitsen van mitigerende maatregelen per type laadruim.

1.4 Leeswijzer

- Hoofdstuk 2 beschrijft de onderzoeksmethode;
- Hoofdstuk 3 beschrijft de bevindingen;
- Hoofdstuk 4 beschrijft de conclusies en de aanbevelingen.

2 METHODE

2.1 Literatuuronderzoek

Aanvankelijk was het de bedoeling om het onderzoek uit te voeren aan de hand van interviews en workshops met deskundigen. Er zijn interviews uitgevoerd met een vertegenwoordiger van de Maritime Incident Response Group (MIRG) en met werknemers van de veerbootrederijen Doeksen en Stena Line. Dat leverde onvoldoende kennis en informatie op voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen.

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen is daarom gekozen voor literatuuronderzoek. Dit is een methode om bestaande kennis over het onderwerp te verzamelen en te analyseren om daarmee de onderzoeksvragen te beantwoorden.

Het literatuuronderzoek leidde tot een inventarisatie van beschikbare kennis omtrent het brandgevaar van elektrische auto's op autoschepen. Het literatuuronderzoek bestond uit zes stappen [Ref 6.]:

1. Formuleren van het probleem

Deze stap betreft het formuleren van de problemen en doelstellingen, het definiëren van de onderwerpen en het verantwoorden van het doen van literatuuronderzoek. Deze stappen zijn uitgevoerd in hoofdstuk 1.

2. Zoeken van literatuur

Deze stap betreft het begin van het verzamelen van informatie. Hier is de basis het identificeren van informatiebronnen en onderzoeken die van toepassing kunnen zijn voor het literatuuronderzoek.

3. Filteren van literatuur

Deze stap betreft het evalueren van de toepasbaarheid van de gevonden bronnen, en op basis daarvan deze selecteren voor-, of verwijderen van het verdere onderzoek.

4. Beoordelen kwaliteit

Deze stap betreft het beoordelen van de methodologische kwaliteit van de in de vorige stap gevonden literatuur.

5. Verzamelen van informatie

Deze stap betreft het verzamelen van informatie voor het beantwoorden van de onder hoofdstuk 1.3 geformuleerde problemen en doelstellingen.

6. Analyseren van de informatie

Deze stap betreft het organiseren, vergelijken, samenvatten en analyseren van de verzamelde informatie. Hiermee zijn de onder hoofdstuk 1.3 gestelde vragen op basis van de geformuleerde problemen en doelstellingen beantwoord.

7. Conclusies en aanbevelingen

Als laatste stap is de verzamelde kennis bijeengebracht, en zijn aanbevelingen gedaan omtrent te nemen vervolgstappen.

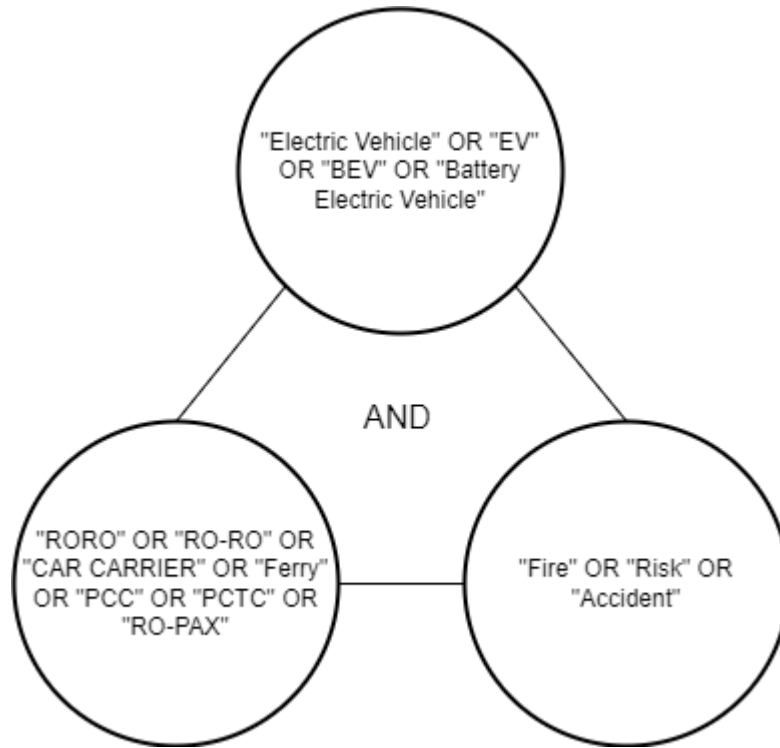
2.2 Geselecteerde literatuur

In deze paragraaf komt het selectieproces voor het kiezen van literatuur aan bod. Aan de hand van een zoekterm zijn verschillende databases geraadpleegd. De resultaten zijn gefilterd en beoordeeld op relevantie. Dit resulteerde aanvankelijk in 2 Europese projecten en 19 onderzoeksproducten als bronmateriaal voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen. Op basis van deze onderzoeksproducten zijn aanvullende onderzoeksproducten gevonden.

Daarnaast is onderzoek gedaan naar relevante wetgeving, richtlijnen, standaarden en voorschriften die van toepassing zijn bij het vervoer van elektrische auto's op autoschepen.

2.2.1 Definiëring van eerste sleutelbegrippen en zoekterm

De sleutelbegrippen in Figuur 2-1 zijn op basis van de introductie gedefinieerd. Deze sleutelbegrippen zijn samengevoegd tot een eerste zoekterm.



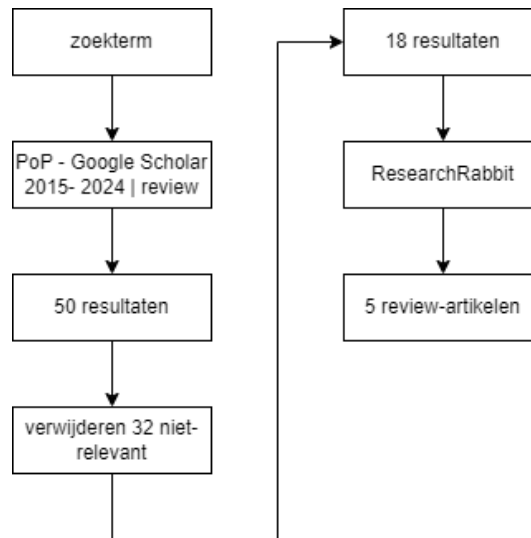
Figuur 2-1 Sleutelbegrippen en zoekterm

2.2.2 Vooronderzoek

Eerst is gezocht naar overlappend, overeenkomend of vraag-specifiek literatuuronderzoek over de gestelde deelvragen.

2.2.2.1 Google Scholar, review-artikelen

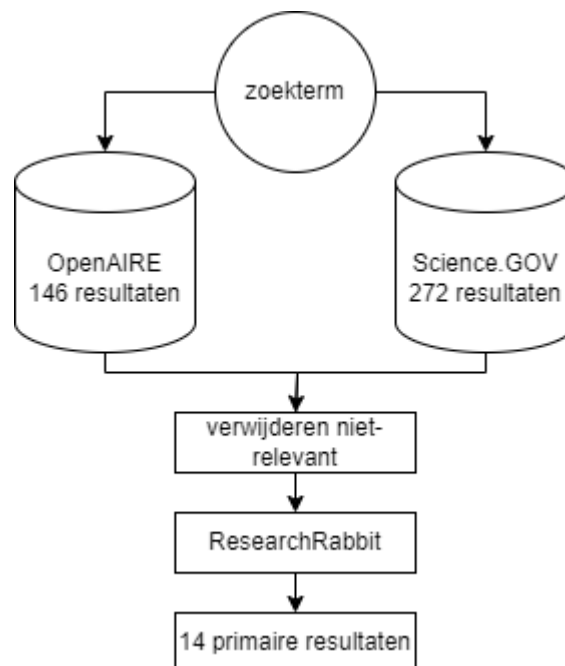
Google Scholar is geraadpleegd met behulp van Publish or Perish (PoP) [Ref 7.]. Er is gezocht binnen de periode 2015 tot en met 2024 en specifiek naar review-artikelen. Hiervoor is gekozen om eerder literatuuronderzoek in kaart te brengen. De resultaten waren gelimiteerd tot maximaal 50 artikelen. Niet-relevante resultaten zijn handmatig verwijderd. Met behulp van ResearchRabbit is gezocht naar eerder, gelijkwaardig, of later werk [Ref 8.] Dit resulteerde uiteindelijk in 5 relevante review-artikelen. Het proces is weergegeven in Figuur 2-2.



Figuur 2-2 Resultaten Google Scholar, review-artikelen

2.2.2.2 OpenAIRE en Science.gov

OpenAIRE¹ en Science.gov² zijn beide openbaar doorzoekbare databases waarin niet alleen artikelen, maar ook overheidsprojecten en -rapporten, theses en andere onderzoeksproducten zijn opgenomen. Hier zijn mogelijke eerdere, overlappende, en aanvullende projecten en onderzoeken over het onderwerp van dit onderzoek geïndexeerd. Een publicatieperiode van de afgelopen 10 jaar is gekozen omdat de elektrische auto een opkomende en doorontwikkende technologie is. Niet-relevante artikelen en duplicaten zijn handmatig verwijderd. Waar mogelijk is met ResearchRabbit gezocht naar eerder, gelijkwaardig of later werk. Dit resulteerde uiteindelijk in 14 primaire onderzoeksproducten en 2 Europese projecten.



Figuur 2-3 Resultaten OpenAIRE en Science.gov

¹ <https://www.openaire.eu/about>

² <https://www.science.gov/about.html>

2.2.2.3 Tweede iteratie

Aan de hand van de bronnen en verwijzingen zijn gedurende het onderzoek meerdere Europese projecten, wetenschappelijke artikelen en ongevalsrapportages geraadpleegd. Alle gebruikte bronnen zijn uiteindelijk terug te vinden in de referentielijst. Wanneer nieuwe informatie overlapt met eerder gevonden informatie, stopte het zoekproces.

3 BEVINDINGEN

3.1 Wetgeving, richtlijnen, voorschriften en standaarden

Het doel van deze paragraaf is om het raamwerk te schetsen van wetgeving, richtlijnen, voorschriften en standaarden waarin een autoschip opereert bij het vervoer van elektrische auto's. In de volgende tabel is daarvan een globaal overzicht gegeven. In de subparagrafen volgt een toelichting.

Tabel 3-1 Globaal overzicht van wetgeving, richtlijnen, voorschriften en standaarden met betrekking tot elektrische auto's op autoschepen

| Wetgeving, richtlijnen, voorschriften en standaarden | |
|--|---|
| Autoruimen op autoschepen | |
| IMO | SOLAS – Hoofdstuk II-2 FSS Code – International Code for Fire Safety Systems MSC.1/Circ.1430 – Revised guidelines for the design and approval of fixed water-based fire-fighting systems for ro-ro spaces and special category spaces MSC.1-Circ.1615 – Interim Guidelines For Minimizing The Incidence And Consequences Of Fires In Ro-Ro Spaces And Existing Ro-Ro Passenger Ships |
| EU | EMSA – Guidance on the carriage of AFVs in RO-RO spaces |
| Klassebureaus | ABS: Best Practices for the Transport of Electric Vehicles on Board Vessels Class NK: Guidelines for the Safe Transportation of Electric Vehicles; List of Fire Safety Measures for the Maritime Transportation of Electric Vehicles; PRS: Guidelines for the Safe Carriage of Alternative Fueled Vehicles (AFVS) on Ro-Ro Ships and on Board Charging of Electric Vehicles |
| Maritieme sector | IUMI (<i>International Union of Marine Insurance</i>): Best practice & recommendations for the safe carriage of electric vehicles (EVs) UECC: UECC Electric Vehicle Carriage |
| Auto's | |
| IMO | IMDG-code (Special Provisions SP961 and SP962) |
| Bemanning | |
| IMO | STCW chapter VI – Advanced Fire Fighting; Basic Safety |

3.1.1 Wet- en regelgeving

Internationaal

Hoofdstuk II-2 van het SOLAS-verdrag is van toepassing als het gaat om de brandveiligheid van autoschepen. Hierin worden eisen gesteld aan het schip om brand te voorkomen en te bestrijden, maar ook aan procedures en brandoefeningen, zodat bemanning in geval van nood adequaat kan handelen. Voor dit laatste moet de bemanning bovendien deelgenomen hebben aan de *Basic Safety*-training volgens de richtlijnen van het STCW-verdrag en, aanvullend, de verdiepende *Advanced Fire Fighting*-training.

De *Fire Safety Systems*-code van de IMO is onderdeel van SOLAS. Het geeft internationale standaarden en specificaties gesteld aan de eisen van hoofdstuk II-2 van het SOLAS-verdrag. Aanvullend hierop heeft de IMO een aantal circulaires uitbracht met specifieke, nieuwe, herziene of aanvullende eisen en/of aanbevelingen, zoals MSC.1/Circ.1430/Rev.3.

Speciale voorschriften of voorzorgsmaatregelen voor het vervoer van elektrische auto's en het voorkomen van brand in elektrische auto's zijn tot dusver vrijwel niet genoemd. Alleen de IMO-circulaire MSC.1-Circ.1615 benoemt dat uitsluitend bevoegd personeel een elektrisch voertuig mag aansluiten op het boordnet.

Het sub-comité SSE (*Ship Systems and Equipment*) van de MSC (*Maritime Safety Committee*) van de IMO buigt zich momenteel over de kwestie. De verwachting is voor 2027 een antwoord te bieden. Momenteel zijn er geen concrete resultaten beschikbaar³.

Elektrische auto's worden geclassificeerd als *Dangerous Good* klasse 9 (UN3481 & UN3171) volgens de IMDG-code, tenzij deze auto's vervoerd worden in een daartoe geschikte voertuigruimte op een autoschip én de batterij geen lekkage vertoont.

IMO-Lidstaten kunnen zowel havenstaat als vlaggenstaat zijn. Hierbij zijn ze verantwoordelijk voor de nationale implementatie (als vlaggenstaat) en naleving (als vlaggenstaat en havenstaat) van in werking getreden IMO-regelgeving op basis van internationale conventies zoals SOLAS.

De EMSA (*European Maritime Safety Agency*) is een gedecentraliseerd Europees overheidsorgaan dat toezicht houdt op de maritieme veiligheid van lidstaten van de Europese Unie (EU). Bovendien heeft de EMSA een adviserende taak. De EMSA heeft in 2022 richtlijnen gepubliceerd voor het vervoer van alternatief aangedreven voertuigen, waaronder elektrische auto's, in de daartoe bestemde ruimten van autoschepen. Naleving van deze richtlijnen is niet verplicht, tenzij er in de toekomst sprake is van een Europese verordening.

Nationaal

Naast de implementatie van internationale regelgeving van IMO of EU kan nationale regelgeving van toepassing zijn op schepen die niet onder de internationale regelgeving vallen. Voorbeelden zijn vrachtschepen kleiner dan 500GT en schepen die geen internationale reizen ondernemen. Uit het onderzoek is niet gebleken dat in Nederland voor deze schepen ten aanzien van het vervoer van elektrische voertuigen specifieke regelgeving bestaat.

3.1.2 Klassebureaus

Klassebureaus zijn organisaties die op basis van eigen voorschriften (class-rules) eisen stellen aan schepen en op basis daarvan certificeren. Oorspronkelijk konden bijvoorbeeld verladers en verzekeraars afgaan op de inspecties van klassebureaus bij de beoordeling over (technische) staat van schepen. Tegenwoordig zetten vlaggenstaten de klassebureau ook vaak in bij het toezicht op de naleving van IMO-regelgeving, Europese regelgeving en nationale wetgeving, aangezien de voorschriften niet meer in strijd kunnen zijn met de wetgeving en deze dus grotendeels overlappen. De 12 meest gerenommeerde klassebureaus zijn verenigd in de *International Association of Classification Societies* (IACS). Deze overkoepelende instantie geeft indien nodig uniforme interpretaties en invulling aan IMO-regelgeving, welke leden kunnen overnemen. Er zijn, voor zover bekend, vanuit de IACS, geen specifieke voorschriften die betrekking hebben op het vervoer van specifiek elektrische auto's in relatie tot brandgevaar en brandbestrijding.

Door individuele klassenbureaus zijn wel documenten publiek gemaakt aangaande het vervoer van elektrische auto's aan boord van autoschepen. Deze verschillen onderling in aanvullende regelgeving voor nieuwbouw en aanbevolen richtlijnen, waarbij sommige klassenbureaus de aanbevelingen van EMSA hebben overgenomen.

³ <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/SSE-10th-session.aspx>

3.1.3 Maritieme sector

De IUMI (*International Union of Marine Insurance*) heeft in 2023 richtlijnen gepubliceerd. In datzelfde jaar publiceerde ook de rederij UECC (*United European Car Carriers*) richtlijnen.

Samenvatting wetgeving, richtlijnen, standaarden en voorschriften

De IMO biedt een regelgevend raamwerk voor de veiligheid van de scheepvaart. Op moment van schrijven is nog niet geanticipeerd op de toename van het vervoer van elektrische auto's op autoschepen. In die leemte hebben tal van verschillende organen en organisaties in recente jaren richtlijnen, standaarden en voorschriften gepubliceerd. Deze verschillen sterk in hun normatieve karakter ("beter opletten" of "let op x, y"), maar ook in gegeven handvaten (één richtlijn raadt af om beschadigde auto's mee te nemen, de ander staat het toe onder voorwaarden) [9].

3.2 Beschrijving Europese projecten: Firesafe I & II, LASH FIRE

Firesafe I en II zijn twee opeenvolgende onderzoeken naar de brandveiligheid van autoschepen, uitgevoerd door het Zweedse onderzoeksinstituut RISE, het klassebureau Bureau Veritas en de rederij Stena Line in opdracht van het EMSA⁴. De nadruk lag hierbij op schepen van het type ro-ro-passagiersschip. In beide onderzoeken is gekeken naar oorzaken van brand, de risico's en welke kostenefficiënte maatregelen (*Risk Control Options*; RCO's) mogelijk zijn. Deze projecten vonden plaats tussen 2016 en 2018 en waren de voedingsbodem voor de in 2019 gepubliceerde IMO-circulaire *Interim Guidelines* (MSC.1/Circ.1615)⁵.

LASH FIRE⁶ is een acroniem voor *Legislative Assessment for Safety Hazards of Fire and Innovations in Ro-ro ship Environment*. Dit project volgde de Firesafe-studies op en vond plaats tussen 2019 en 2023. In aanvulling op de voornoemde partijen namen nog 27 andere partijen aan het project deel. Het doel van het project was om operationele en ontwerpmatige oplossingen aan te dragen voor verbeterde brandpreventie, -detectie en -bestrijding aan boord van autoschepen, waardoor externe interventie minder snel nodig is. LASH FIRE bestond uit meerdere werkgroepen die elk zich op een ander aspect van het onderzoeksdoel richtte.

Tabel 3-2 LASH FIRE-werkgroepen

| Wergroep | Onderwerp | Onderzoeksproduct |
|----------|--------------------------------------|-------------------|
| 3 | <i>Cooperation and Communication</i> | deelrapporten |
| 4 | <i>Formal Safety Assessment</i> | deelrapporten |
| 5 | <i>Ship Integration</i> | deelrapporten |
| 6 | <i>Effective Manual Operations</i> | deelrapporten |
| 7 | <i>Inherently Safe Design</i> | deelrapporten |
| 8 | <i>Ignition Prevention</i> | deelrapporten |
| 9 | <i>Detection</i> | deelrapporten |
| 10 | <i>Extinguishment</i> | deelrapporten |
| 11 | <i>Containment</i> | deelrapporten |

⁴ European Maritime Safety Agency. Subsidieregeling EMSA/OP/01/2016 en 2017/EMSA/OP/17/2017.

⁵ https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_641655_14/1/

⁶ <https://lashfire.eu/project-info/> EU Horizon 2020 research and innovation programme – No 814975

3.3 Brandeigenschappen van elektrische auto's

In dit onderzoek is specifiek gekeken naar de onderscheidende kenmerken van een elektrische autobrand. Dit is gedaan door te vergelijken met brand in een reguliere brandstofauto. Vervolgens is ingezoomd naar de brandkenmerken van de lithium-ion-batterij, die de elektrische auto van energie voorziet. Ten slotte is geanalyseerd hoe het vervoer aan boord van autoschepen de gevonden karakteristieken verder beïnvloedt.



Figuur 3-1 Brandeigenschappen elektrische auto's aan boord van autoschepen

3.3.1 Introductie brandeigenschappen

Brandeigenschappen worden grofweg vertaald in twee categorieën: brandbaarheid en brandbestendigheid. Brandbaarheid is hoe een object reageert op hitte of vuur, te beschrijven in termen als ontvlambaarheid, vlamverspreiding, warmteafgifte en mate van productie van restproducten zoals giftig rook. Brandbestendigheid bestaat uit de brandvertragende en brandwerende eigenschappen.

De focus in deze literatuurstudie ligt op brandbaarheid. Eén van de belangrijkste aspecten om de ernst van een brand te beoordelen is het brandvermogen [Ref 10.]. Dit vertelt iets over de hoeveelheid energie dat een brandend object toevoegt per tijdseenheid. Dit staat in de literatuur bekend als *Heat Release*, weergegeven als *Heat Release Rate* (HRR) en uitgedrukt in kilo- of megawatt. De piekwaarde is wanneer de brand het meest intens is. Het brandvermogen is dan op zijn hoogst: dit noemt men *Peak Heat Release Rate* (PHRR).

Normaal gesproken verloopt een brand niet constant, het begint langzaam, piekt, en dooft. Daarom is er ook de optelsom van de *Heat Release Rate* voor een brand van begin tot eind: de *Total Heat Release* (THR). Dit vertaalt zich naar vuurlast of brandenergie. Ieder object heeft een bepaalde hoeveelheid brandenergie dat vrijkomt bij brand. Brandenergie dat vrijkomt bij een brand en afstraalt op een oppervlak, noemt men vuurbelasting.

Kortom, als in korte tijd een object al zijn brandenergie verliest, dus geheel opbrandt en de totale vuurlast wordt benut (THR), spreekt men van een brand met een hoog brandvermogen: de warmteafgiftesnelheid ligt hoog (HRR).

3.3.2 Brandbaarheid van de elektrische auto tegenover een reguliere brandstofauto

De individuele meetwaarden voor een elektrische auto of een reguliere brandstofauto krijgen geen uitgebreide toelichting. In voorliggend onderzoek is ervoor gekozen om de nadruk te leggen op de verschillen in brandbaarheid tussen elektrische auto's en reguliere brandstofauto's. Wel is in het interview met een vertegenwoordiger van de Maritime Incident Response Group (MIRG) naar voren gekomen dat een autobrand, ongeacht het type brandstof en aandrijving, een forse hitte-uitstraling heeft. Dat betekent dat een autobrand het vermogen heeft om binnen enkele minuten over te slaan op nabij geplaatste ander auto's, zoals op ro-ro-dekken op schepen. Die hitte-uitstraling maakt het ook moeilijk en gevaarlijk om een autobrand tot dichtbij te benaderen.

De specifieke oorzaak van een brand vormt een beperking bij het vergelijken van de brandbaarheid van een elektrische auto met die van een reguliere brandstofauto. De oorzaak van de brand heeft namelijk invloed op het brandverloop. Hoewel de totale vuurlast bij het volledig opbranden van de verschillende typen auto's gelijk kan zijn, is het belangrijk om te weten hoe snel een brand intensiveert. Een brand die snel in intensiteit toeneemt vereist een andere aanpak dan bijvoorbeeld een brand die juist zeer langzaam ontstaat en daardoor lang onopgemerkt blijft.

Met die overweging rekening houdend zijn eerst de bevindingen over brandbaarheid van elektrische auto's weergegeven.

3.3.2.1 Brandproeven op ware schaal

De beste manier om inzicht te krijgen in de brandeigenschappen van een auto is de auto in een gecontroleerde omgeving in brand te steken en daarbij met sensoren de brandeigenschappen te meten. Zowel reguliere brandstofauto's en elektrische auto's verschillen onderling in onder meer lengte, gewicht en hoeveelheid in de auto aanwezige aandrijfenergie. Daarnaast is vooral bij elektrische auto's de trend dat per jaar de batterijen een grotere capaciteit krijgen. Dit maakt elektrische auto's vaak steeds groter en zwaarder. Hierdoor is het lastig een gemiddelde elektrische auto met een gemiddelde reguliere brandstofauto te vergelijken. Bovendien is het een prijzige exercitie, waardoor het aantal uitgevoerde volledige brandproeven beperkt is.

LASH FIRE – Werkgroep 10.4: literatuurstudie van brandproeven

Werkgroep 10.4 van het LASH FIRE-project hield zich bezig met het thema blussen. Dit gaf aanleiding om in het rapport van de werkgroep een literatuurreview te geven van de brandeigenschappen van een elektrische auto in vergelijking met een reguliere brandstofauto. Daarbij beschreef men eerst de brandeigenschappen van de batterij. Uit dit laatste kwam naar voren dat de hoeveelheid elektrische lading (*State Of Charge; SOC*) invloed heeft op de *Heat Release Rate* (HRR) en niet zozeer op de *Total Heat Release* (THR). Het ontwerp van het batterijpakket heeft invloed op hoe, en in welke mate steekvlammen zich manifesteren.

In deelrapport 10.4 van het LASH FIRE-project zijn vier onderzoeksproducten geanalyseerd waarin brandproeven op ware schaal zijn uitgevoerd. Hiervan dateren er twee uit 2012 en twee uit 2016. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 3-2. Hieruit komt naar voren dat de (P)HRR, tijd tot (P)HRR, en THR per auto zeer verschilt, los van het type voortstuwing en vaak in relatie is met het totale gewicht van de auto. Uit de onderzoeken bleek dat de ernst van brand in een elektrische auto vergelijkbaar is met die van brand in auto's met een verbrandingsmotor. De onderzoekers schreven verschillen in warmteafgifte, waardoor soms elektrische autobranden meer ernstig zijn en soms niet, toe aan vermoedelijk de steekvlammen uit het batterijpakket of aan het wegvloeien van brandstof.

Het lage aantal uitgevoerde grote brandproeven en daarin de relatief lage batterijcapaciteiten van de geteste auto's, beperkt de betrouwbaarheid van de resultaten van de beschreven brandproeven. De auteurs houden de vraag open in hoeverre de batterij bijdraagt aan de ernst van de brand, met een ruwe schatting dat het vergelijkbaar is met de bijdrage van vloeibare brandstoffen [Ref 11.].

LASH FIRE – Werkgroep 10.4: brandproof op ware schaal

Werkgroep 10.4 vond in de literatuur geen gegevens waarin de effectiviteit van (verschillende) sprinklersystemen zijn getest bij een elektrische autobrand. Dat gaf aanleiding om een volledige brandproof uit te voeren met twee reguliere brandstofauto's en twee elektrische auto's.

Daarbij veroorzaakten de onderzoekers brand door het ontsteken van het batterijpakket in de elektrische auto's en de vloeibare brandstof in de reguliere brandstofauto's. Hierdoor waren er verschillen in het verloop van de brand. Door het ontsteken van de vloeibare brandstof ontwikkelde de brand in de reguliere brandstofauto zich snel, zodat na een minuut al met het blussen werd begonnen. De brand in de elektrische auto ontwikkelde langzamer: na 12 en respectievelijk 16 minuten begon men met water te blussen.

De algehele conclusie was dat het deluge-sprinklersysteem (zie volgend kader) goed in staat was de brand in beide type auto's te bestrijden, en dat hierbij de elektrische auto niet uitdagender was dan de reguliere brandstofauto. Juist werd nadruk gelegd op het gevaar van weglekkende vloeibare brandstof, waarin het gevaar huist dat brand zich snel verspreidt [Ref 12.].

Uitleg sprinklersystemen:

Deluge-, drencher- en sprinklersysteem zijn termen waar vaak hetzelfde mee bedoeld wordt. Er zijn verschillen in de werking van sprinklersystemen.

Er is onderscheid tussen een droog en een nat sprinklersysteem. In een droog sprinklersysteem staan alle waterleidingen onder druk van lucht of stikstof. Wanneer een automatische sprinkler (een sproeikop die open gaat door hitte) geactiveerd wordt, valt de druk in het leidingwerk weg waardoor een klep opent en water onder druk het leidingwerk binnengaat. In een nat sprinklersysteem staat er water in de leidingen direct achter de automatische sproeikoppen.

Een automatisch sprinklersysteem is een systeem dat gebruikt maakt van automatische sprinklers of dat automatisch in werking treedt door een branddetectiesysteem. Dit kan een droog of een nat systeem zijn. Bij een brand in een autoruim met automatische sprinklers geven alleen de sprinklers water die hitte detecteren.

Deluge-sprinklersysteem: dit is een sprinklersysteem waar alle sproeikoppen standaard open staan. Tijdens brand kan een 'deluge'-klep manueel en/of automatisch geopend worden door een branddetectiesysteem. Na het openen stroomt via de klep water onder druk het gehele sprinklersysteem binnen. Omdat alle sproeikoppen open staan, komt water uit alle geïnstalleerde sproeikoppen gelijktijdig vrij. *Drenchen* is het toepassen van het deluge-sprinklersysteem [Ref 13.]. Met het *drencher-sprinklersysteem* wordt in dit onderzoek een deluge-sprinklersysteem bedoeld.

In de IMO-circulaire MSC.1/Circ.1430 staan de eisen omschreven waaraan een sprinklersysteem moet voldoen aan boord van een ro-ro-schip.

| Type | Vehicle [Reference] | Mass [kg] | Energy stored | Peak HRR [MW] | Time to peak HRR [min] | Total heat release [GJ] |
|------|--------------------------------|-----------|--|---------------|------------------------|-------------------------|
| BEV | 2011 Nissan Leaf [Watanabe] | 1520 | 24 kWh | 6,3 | 40 | 6,4 |
| | Unknown [Lecocg] | 1122 | 16,5 kWh | 4,2 | ~25 | 6,3 |
| | Unknown [Lecocg] | 1501 | 23,5 kWh | 4,7 | ~20 | 8,5 |
| | 2014 Vehicle A [Lam] | 1448 | 'Large' LIB 100 % SOC | 6,0 | 7 | - |
| | 2013 Vehicle A [Lam] | 1475 | 'Large' LIB 85 % SOC | 5,9 | 5,8 | 4,9 |
| | 2013 Vehicle B [Lam] | 1659 | 'Large' LIB 100 % SOC | 6,9 | 10,2 | 4,7 |
| | 2019 BEV A [Willstrand] | - | 40 kWh | ~7 | ~27 | 5,2 |
| | 2016 BEV A [Willstrand] | - | 24 kWh | ~5,2 | ~21 | 6,7 |
| PHEV | 2013 Vehicle C [Lam] | 1466 | 'Small' LIB 85 % SOC and full tank of gasoline | 6,0 | 7,5 | 4,6 |
| | 2014 Vehicle D [Lam] | 1711 | 'Medium' LIB. 100 % SOC and full tank of gasoline | 7,9 | 8,3 | 5,9 |
| ICEV | Unknown [Lecocg] | 1128 | Full tank of diesel | 4,8 | ~20 | 6,9 |
| | 2003 Honda Fit [Watanabe] | 1275 | 10 l of gasoline | 2,1 | 35 | 4,3 |
| | Unknown [Lecocg] | 1404 | Full tank of diesel | 6,1 | ~30 | 10,0 |
| | 2015 Vehicle A [Lam] | 1096 | Full tank of gasoline | 7,1 | 6 | 3,3 |
| | 2013 Vehicle B [Lam] | 1344 | Full tank of gasoline | 10,8 | 8 | 5,0 |
| | Toyota luxury sedan [Watanabe] | - | 10 l of gasoline | - | - | 7,4 |
| | Toyota minivan [Watanabe] | - | 10 l of gasoline | - | - | 5,9 |
| | Toyota minivan [Watanabe] | - | 10 l of gasoline | - | - | 5,3 |
| | Subaru stationwagon [Watanabe] | - | 10 l of gasoline | - | - | 5,6 |
| | Toyota sedan [Watanabe] | - | 10 l of gasoline | - | - | 5,1 |
| | 2011 ICEV A [Willstrand] | - | 44 l of diesel | ~5,6 | ~14 | 5,9 |

Figuur 3-2 Samenvatting van de testresultaten uit het literatuuronderzoek van werkgroep 10.4 [Ref 11.]

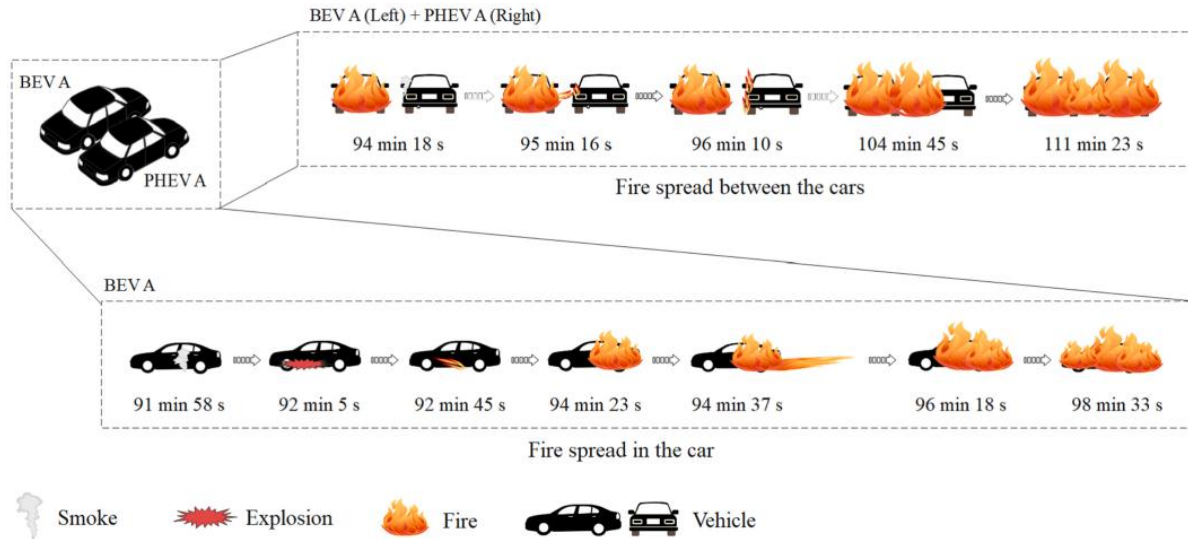
Andere volledige brandproeven

Naast de samenvatting van de brandproeven geïdentificeerd in de literatuurstudie van de LASH FIRE-werkgroep, en de brandproef door die werkgroep uitgevoerd, zijn in de literatuur vijf andere, recente brandproeven op ware schaal gevonden:

- In 2022 zetten Cui et al. twee keer een plug-inhybride auto in brand door het veroorzaken van *thermal runaway* (zie volgend kader) in de lithium-ion-batterij. Opvallend bij de brandontwikkeling was het exploderen van gassen die voortkwamen uit de batterij. De explosieve gassen, veroorzaakt door de thermal runaway, vormden gedurende 60 minuten witte rook onder en rondom de auto. Daarbij was een vonk voldoende om de gassen te laten ontploffen.

Cui et al. benadrukken het gevaar van explosies bij elektrische autobranden voor autoschepen: *“In the future, such blasts are highly likely to occur during PHEV fires in enclosed facilities such as ro-ro vessels, underground car parks, and tunnels”*. Ook stellen de auteurs dat plug-inhybride auto's meer brandbare materialen bevatten met een hogere energiedichtheid dan reguliere brandstofauto's, waardoor een brand intenser is en zich sneller verspreidt [Ref 14.].

Daarnaast plaatsten Cui et al. in 2022 een nieuwe elektrische auto en een nieuwe plug-inhybride auto naast elkaar. De lithium-ion-batterij van de elektrische auto werd met een externe hittebron tot thermal runaway gebracht. Het brandverloop begon met witte rook dat geconcentreerd onder de auto bleef. Vervolgens volgde een explosie van die rookgassen en daarna de zichtbare vlammen, waaronder steekvlammen. De energiecapaciteit en het ontwerp van de batterij waren van invloed op hoe de steekvlammen zich manifesteerden. De steekvlammen veroorzaakten mede de snelle verspreiding van het vuur naar de naastgelegen auto [Ref 15.], [Ref 16.].

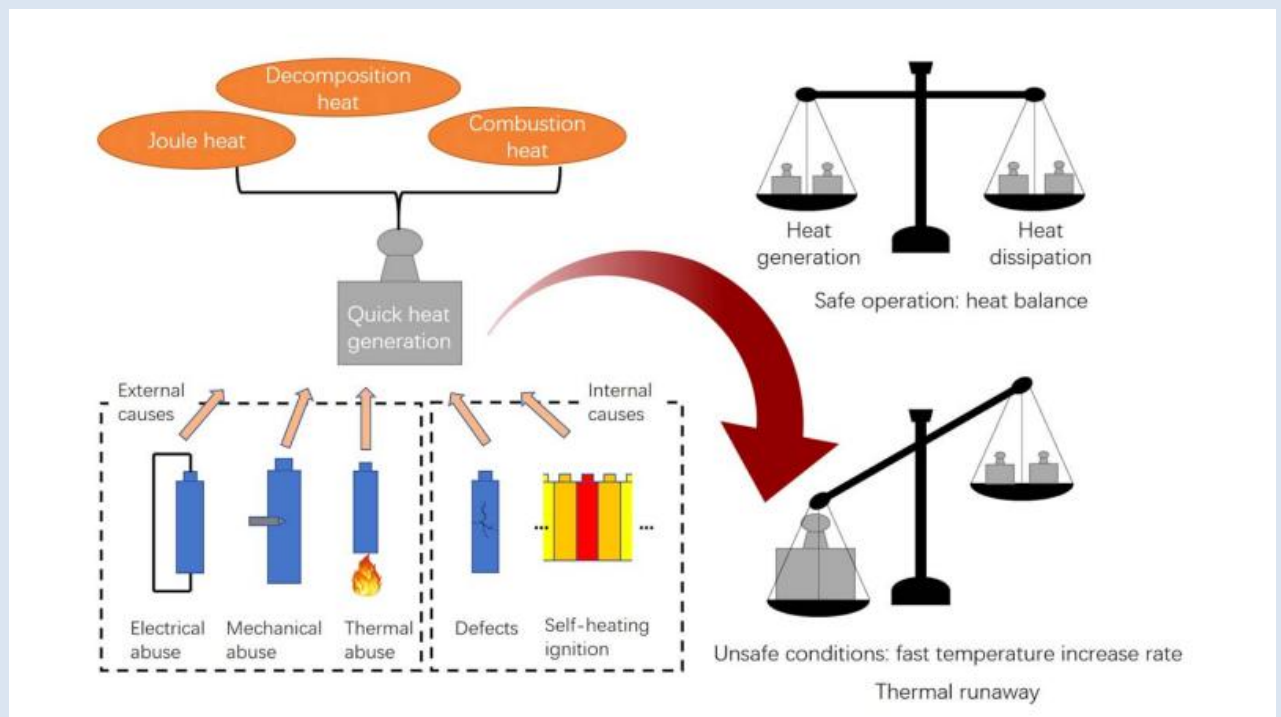


Figuur 3-3 Brandontwikkeling tussen twee voertuigen [Ref 16.]

Thermal runaway

Thermal runaway is het proces waarbij de temperatuur in een lithium-ion-batterij dusdanig hoog is dat deze een kettingreactie veroorzaakt. Die kettingreactie bestaat uit exothermische reacties waarbij meer energie wordt toegevoegd dan kan worden afgevoerd. Dit proces produceert warmte, giftige en explosieve rookgassen en zuurstof. Meestal begint dit in een enkele cel. Thermal runaway is weergegeven in onderstaande figuur .

Thermal runaway is het grootste gevaar van een lithium-ion-batterij. Een botsing, onjuist opladen of een externe hittebron zijn externe oorzaken die thermal runaway kunnen veroorzaken. Kortsluiting of fabrieksdefecten kunnen interne oorzaken zijn. Als de exothermische reactie in de batterij eenmaal in gang is gezet, blijft deze doorgaan tot de energie op is. Daardoor kan een brand in een elektrische auto gemakkelijk weer opvlammen na aanvankelijk te zijn geblust [Ref 15.].



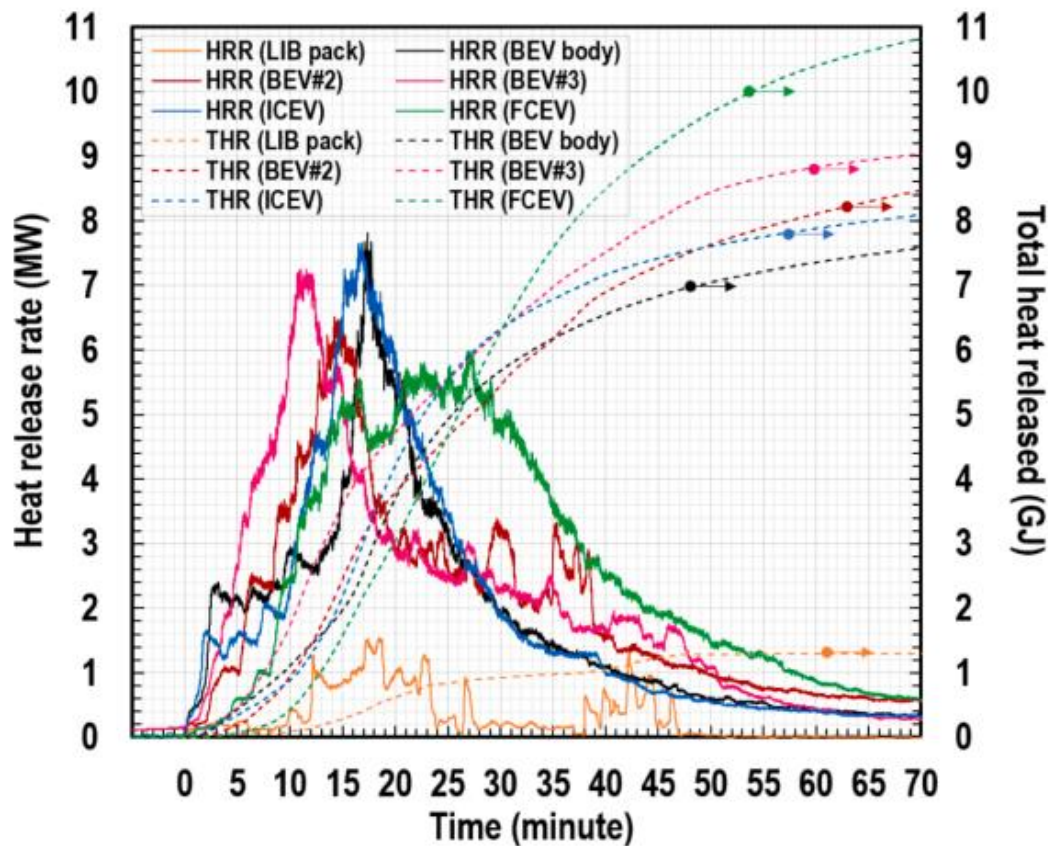
Thermal runaway [Ref 15.]

- Gehandler et al. onderzochten in 2022 hoe branden te bestrijden in een brede groep alternatieve brandstofauto's. De onderzoekers borduurden voort op een conclusie van een voorgaand project (BREND) dat waarschuwde om rookgassen van een elektrische autobrand zoveel mogelijk te vermijden, vanwege de vermoedelijke giftigheid. Dit vermijden kan het tijdig bestrijden van een brand ernstig vertragen.

Naast 'normale' irriterende en verstikkende verbrandingsgassen produceert een elektrische autobrand namelijk waterstoffluoride (*hydrogen fluoride*; HF). Dit is een giftig gas dat zeer gevaarlijk is bij inademing en mogelijk ook via de huid kan binnendringen. Het dragen van genormeerde brandwerende kleding en adembescherming blijkt echter voldoende om de risico's van HF tegen te gaan.

Gehandler et al. benadrukken verder dat, ongeacht het type auto, vooral focus moet liggen op het gevaar van alle rookgassen samen, in plaats van alleen te focussen op de aanwezigheid van individuele stoffen [Ref 18.].

- In 2023 verwijst Hynynen et al. naar dezelfde brandproeven waar Gehandler et al. gebruik van hebben gemaakt. Het onderzoek toont dat THR en (P)HRR gerelateerd zijn aan het brandscenario en de grootte van de auto en niet significant door het type aandrijfenergie. Hynynen vond hogere waarden van waterstoffluoride in de verbrandingsgassen bij elektrische auto's, maar binnen deze waarden was veel variatie. Waterstoffluoride kan met andere stoffen reageren en de hoeveelheid uitstoot is heel situatieafhankelijk [Ref 19.].
- In 2023 vinden Kang et al. vergelijkbare THR- en HRR-waarden Figuur 3-4 bij brandproeven waarin een elektrische auto en reguliere brandstofauto worden vergeleken. Materialen van het interieur en de carrosserie voeden het grootste deel van een brand. Echter, steekvlammen vanuit de lithium-ion-batterij bleken snelle verspreiding van de brand te kunnen veroorzaken. De onderzoekers benadrukken dat brand veroorzaakt door thermal runaway gevaarlijker is voor brandbestrijders dan brand die ergens anders is ontstaan. Vlammen zijn pas laat zichtbaar en kunnen zich snel ontwikkelen en verspreiden [Ref 20.].



Figuur 3-4 HRR en THR elektrisch (BEV) en conventioneel (ICEV) [Ref 20.]

3.3.2.2 Overzichtsstudies en onderzoeksproducten over brandbaarheid

Sun et al. rapporteren in 2020 dat brandrisico- en gevaar van lithium-ion-batterijen in elektrische auto's een serieuze factor zijn: de markt verwacht hoge (en steeds hogere) batterijprestaties, er zullen ooit auto-ongelukken mee gebeuren en batterijen zullen alleen maar meer in omvang en energiedichtheid toenemen. De auteurs benoemen het lage aantal van volledige brandproeven van elektrische auto's en geven als argument hiervoor de bijbehorende kosten en de beperkingen door bedrijfsgeheimen. Ondanks de beperkingen vinden de onderzoekers geen grote verschillen in brandvermogen tussen de verschillende type auto's.

De PHRR houdt verband met de energiec capaciteit van de batterij. Ook kan de batterij van een elektrische auto meer giftige rookgassen uitstoten, zoals bijvoorbeeld HF. De onderzoekers benoemen dat een elektrische autobrand moeilijker is om te blussen door de mogelijkheid van het opnieuw ontbranden van de batterij. Ook het grondig koelen van de batterij blijkt moeilijk.

Langdurig blussen met veel water blijkt de meest effectieve manier van blussen. Door daarbij water direct op de batterij te richten is het mogelijk de hoeveelheid bluswater te verminderen. Ten slotte geven de auteurs als advies om in de toekomst betere en effectievere brandprotectiesystemen te ontwerpen voor plaatsen waar veel elektrische auto's samenkomen [Ref 21.].

Wang et al. (2019) rapporteren onder andere het gevaar van brandbare gassen en ontvlambare damp/luchtmengsels die kunnen ontstaan bij thermal runaway, alsmede het gevaar van steekvlammen. Daarnaast wordt de diversiteit in batterijontwerpen benoemd en de verschillende brandverlopen en karakteristieken die daar het gevolg van zijn. De lading van de batterij en de staat van de batterij zijn beiden van invloed op de kans en duur van thermal runaway [Ref 22.].

Christensen et al. (2021) benoemen het specifieke gevaar van opnieuw ontbranden van een elektrische auto, nadat de brand in de auto in eerste instantie lijkt te zijn geblust. Hierbij wijzen de onderzoekers specifiek op *gestrande energie* na een brand, dat een potentieel gevaar is voor brandbestrijders. Gestrande energie in deze context is energie die nog in de batterij aanwezig is en elektrocutiegevaar kan opleveren voor de brandbestrijders. Ook wordt het vrijkomen van schadelijke rookgassen zoals waterstoffluoride (HF) benoemd, waarbij de hoeveelheden sterk kunnen verschillen per type batterij.

Christensen et al. leggen de nadruk op het gevaar van witgrijze rookgassen die kunnen ontstaan door thermal runaway, omdat die gassen een explosie kunnen veroorzaken wanneer de gassen in contact komen met een ontstekingsbron. Hierbij benoemen de onderzoekers het gevaar van blussen door bijvoorbeeld het verdrijven of onttrekken van zuurstof door een brandbestrijdingssysteem. De giftige en ontvlambare gassen kunnen langer of opnieuw opbouwen en leiden tot een nieuwe explosie [Ref 23.].

Samenvatting brandeigenschappen

Het brandvermogen van een elektrische auto is vergelijkbaar met een normale brandstofauto. Dit komt omdat het brandvermogen bij deze auto's voornamelijk afkomstig is uit het interieur, carrosserie en chassis. Ongeveer 15-20% van de totale vuurlast is toe te schrijven aan de batterij of brandstof.

Het brandverloop van een elektrische auto is wel anders. Wanneer de brand begint met een thermal runaway kan het lange tijd duren voordat er zichtbare vlammen zijn. Hier kan een explosie van door thermal runaway ontstane rookgassen aan voorafgaan. Nadat het vuur is uitgebroken verloopt de brand grillig. Steekvlammen vanuit de batterij zijn hierbij kenmerkend. De heftigheid van de brand wisselt en de brand kan nadat het eerst lijkt te doven plots weer in heftigheid toenemen.

Deze grilligheid in brandverloop is groter naarmate de batterij van de auto meer energie bevat. De brand kent heftigere steekvlammen, bereikt eerder de piekwaarde van warmteafgifte en blijft langer doorbranden.

Explosies en steekvlammen kunnen het vuur snel verspreiden binnen de auto, maar ook naar naastgelegen auto's. Een brandende batterij stoot naast normale rookgassen ook het giftige gas waterstoffluoride (HF) uit.

3.4 Brandrisico's

Is de kans groter dat een elektrische auto plots gaat branden of is de kans groter dat een conventionele plots auto gaat branden? Hoe groot is de kans dat brand aan boord van een autoschip ontstaat, en als het ontstaat, dat het in de auto ontstaat? En wanneer het in de auto ontstaat, hoe, en waar?

Een probleem bij het beoordelen van risico's is het feit dat de situatie met betrekking tot elektrische auto's blijft veranderen: het aantal auto's neemt toe en auto's ontwikkelen zich steeds meer. Het is lastig om een elektrische auto van nu te vergelijken met een elektrische auto over 10 jaar, of met een auto van 10 jaar terug. En hoe is data verzameld? Zijn statistieken gebaseerd op rijdende auto's, auto's die in botsing komen?

Hoe vaak is het eigenlijk voorgekomen dat een elektrische auto aan boord van een autoschip de oorzaak was van een brand?

Om deze vragen te beantwoorden zijn verschillende risicoanalyses geïdentificeerd en geanalyseerd:

Tabel 3-3 Risico analyses.

| Jaar | Auteur | Titel | Scope |
|------|---------------|---|---|
| 2023 | Bao et al. | A Hybrid Approach for Quantitative Analysis of Fire Hazards in Enclosed Vehicle Spaces on Ro-ro Passenger Ships [Ref 24.] | Branden op autoschepen (fire hazards that occur in the enclosed vehicle spaces of Ro-pax) serious accident |
| 2023 | Kim & Jeon | The causes and responses to cargo hold fireaccidents in RoRo ships using AcciMap [Ref 25.] | Branden op autoschepen (cargo hold) |
| 2022 | Chen et al. | Electric Vehicle Fire Risk Assessment Based on WBS-RBS and Fuzzy BN Coupling [Ref 26.] | Autobranden |
| 2020 | LASH FIRE | Review of accident causes and hazard identification report | Branden op autoschepen |
| 2020 | Firesafe II | Firesafe II Detection and Decision [Ref 27.] | Branden op autoschepen |
| 2023 | Hassan et al. | Fire Incidents, Trends, and Risk Mitigation Framework of Electrical Vehicle Cars in Australia | Elektrische autobranden |

3.4.1 Frequentie van brand aan boord van autoschepen

De Firesafe II-studie gebruikte ongevallendata van de EMSA. In de periode 2002-2016 werden 132 branden aan boord van ro-ro-passagiersschepen genoteerd. Hiervan ontstonden 37 branden (28%) in een ro-ro-ruimte. Hierbij werd een frequentie van 5.28E-03 per schipjaar geconstateerd [Ref 27.].

In deelrapport D04.2 'Ro-ro space fire database and statistical analysis report' van de LASH FIRE-studie zijn de volgende waarden voor ro-ro-ruimten naar voren gekomen:

Tabel 3-4 Brandfrequentie ro-ro-ruimten LASHFIRE D04.2 in de periode 2002-2018

| Type schip | Totaal schipjaren | Ongevallen | Ernstige ongevallen ⁷ | Brandfrequentie ongevallen | Brandfrequentie ernstige ongevallen |
|-----------------------|-------------------|------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| ROPAX | 9 359 | 30 | 22 | 3.21E-3 | 2.35E-3 |
| RORO | 8 073 | 12 | 10 | 1.49E-3 | 1.24E-3 |
| PCC & PCTC | 11 703 | 18 | 14 | 1.54E-3 | 1.20E-3 |
| totaal | 29 135 | 60 | 46 | 2.06E-3 | 1.58E-3 |

De frequentie van ongevallen en/of branden aan boord van autoschepen zijn uitgedrukt in schipjaren. Het aantal schipjaren refereert aan de tijd dat een schip vanaf het moment van inschrijving in de registers in de vaart is gekomen tot aan het einde van de studie. Voor schepen die voor het einde van de studie uit de vaart zijn genomen geldt het aantal jaren dat het schip totaal in de vaart is geweest.

LASH FIRE heeft voor de statistieken data uit verschillende ongevallendatabases⁸ gebruikt, om zo een wereldwijd beeld te kunnen schetsen. De gevonden frequenties komen globaal overeen met data uit eerdere studies maar ro-ro-branden, met kleine afwijkingen als gevolg van verschillen in de definiëring van type ongevallen of type schepen (de eerder genoemde Firesafe II-studie neemt data mee van schepen zwaarder dan 1000GT, waarbij bij LASH FIRE de ondergrens op 5000GT ligt).

Ter vergelijking, uit de CARGOSAFE-studie (equivalente studie naar de frequentie van containerbranden, in opdracht van het EMSA) komt naar voren dat in het begin van 2000 de frequentie van het aantal containerbranden op 7.50E-4 per schipjaar lag en dat dit verdubbeld was in 2020 (1.50E-3) [Ref 28.]. Afgezet tegen containercapaciteit bleef die waarde gedurende diezelfde periode op 3.70E-7 brand/TEUjaar (een TEU is één containereenheid).

In het LASH FIRE-deelrapport D04.2 is ook gekeken naar de brandfrequentie per vervoerd voertuig (CEU, één voertuigeenheid). In de volgende tabel worden de waarden gegeven:

Tabel 3-5 Containerbrand versus voertuigbrand.

| Type brand | Totaal TEU of CEU/jaren | Alle brandongevallen | Brandfrequentie ongevallen | Periode |
|-----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|-----------|
| Containerbrand | 335.000.000 | 124 | 3.70E-7 | 1998-2021 |
| Voertuigbrand | 54.052.801 | 18 | 3.33E-7 | 2002-2018 |

Het blijkt dat brand in een autoruim het vaakst voorkomt aan boord van ro-ro-passagiersschepen (ROPAX). In het LASH FIRE-onderzoek is daarom ook de vergelijking gemaakt met het aantal branden per 'lane meter'-jaar. Hier is brand niet uitgezet per schipjaar of per voertuigeenheid, maar per hoeveelheid laadruimte. Hieruit kwam naar voren dat brand op ro-ro-passagiersschepen drie keer vaker voorkomt dan op ro-ro-schepen.

⁷ Hierin is 'ongevallen' IMO Less Serious; en 'ernstige ongevallen' IMO Very Serious en IMO Serious (MSC-MEPC.3/Circ.3 en MSC-MEPC.7/Circ.7).

⁸ Waaronder EMCIP (European Marine Casualty Information Platform) van de EMSA en GISIS MCI (een ongevallendatabaseplatform) van de IMO.

Ro-ro-ruimten, de plaatsen op autoschepen die bedoeld zijn voor het vervoer van auto's, bestaan uit drie categorieën: open ro-ro-ruimte, gesloten ro-ro-ruimte en weerdek (zie onderstaand kader). 1 van de 30 brandongevallen op ROPAX-schepen ontstond op het weerdek. Op dit dek, blootgesteld aan de buitenlucht, kan brand zich door die factor waarschijnlijk minder goed ontwikkelen en heeft het waarschijnlijk minder grote gevolgen [Ref 29].

Gesloten autoruim, open autoruim en weerdek.

Autoruimten of ro-ro-ruimten van autoschepen zijn verdeeld in drie klassen. Het SOLAS-verdrag geeft de definities van autoruimte en de bijbehorende driedelige onderverdeling.

Autoruimen zijn ruimten die doorgaans in lengterichting het gehele schip bestrijken, bedoeld voor het stallen van motorisch aangedreven voertuigen met brandstof in de brandstoftank voor eigen voorstuwing.

Open autoruimten (*open ro-ro spaces*) zijn aan beide einden, of aan één einde open, waarbij het ruim over de gehele lengte adequate natuurlijke ventilatie heeft door openingen in de wanden (onder en boven inbegrepen) waarbij de openingen minimaal 10% van het ruimteoppervlak bestrijken.

In de Nederlandstalige definitievoering heet een weerdek (*weather deck*) een aan weer en wind blootgesteld dek. Dit is een dek dat van boven en aan minimaal twee zijden is blootgesteld aan weer en wind.

Ten slotte zijn er de gesloten autoruimten (*closed ro-ro spaces*). Dat zijn alle autoruimen die niet aan de definities van open autoruim en weerdek voldoen.

Bao et al. (2023) analyseerden met behulp van literatuuronderzoek 62 brandongevallen in *enclosed ro-ro spaces* (open en gesloten autoruimten) om zo de oorzaken te kunnen kwantificeren als kans op brandongeval-oorzaak per schipjaar. Als resultaat van dat onderzoek zijn de 5 belangrijkste oorzaken weergegeven in tabel 8. Bovendien identificeerde dat onderzoek een kans op brand van $4.31E-3$ per schipjaar [Ref 24.]. Deze waarde ligt tussen de Firesafe II- en de LASH FIRE-studie in (respectievelijk $5.28E-03$ en $3.21E-3$ per schipjaar).

Tabel 3-6 Belangrijkste oorzaken van brand in enclosed ro-ro spaces [Ref 24.]

| Ranglijst | Oorzaak |
|-----------|---|
| 1 | Spontane ontbranding van de lading |
| 2 | Lithium-ion-brand in een elektrische auto |
| 3 | Ladingbrand (oorzaak onbekend) |
| 4 | Tweedehands auto-brand |
| 5 | Elektrische brand in een reefer |

3.4.2 Brandrisico's van elektrische auto's

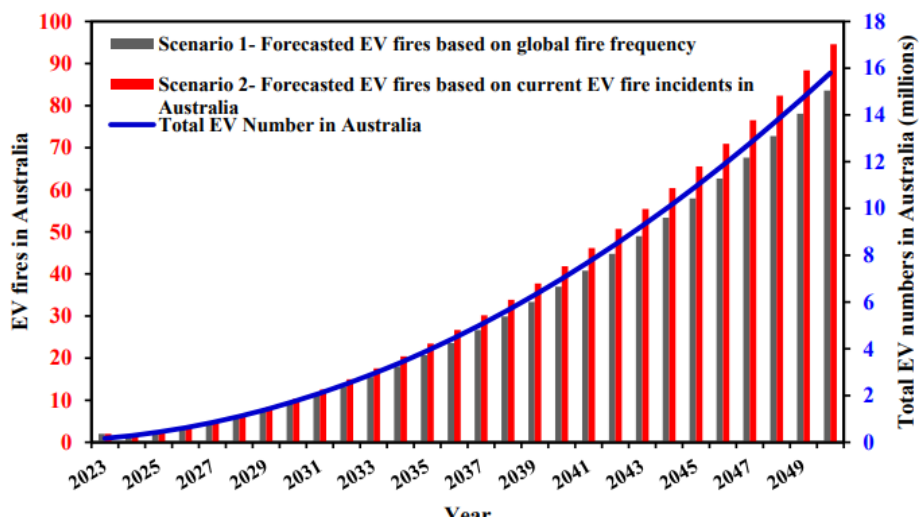
Chen et al. (2022) verdelen de elektrische auto allereerst in 4 deelsystemen (waaronder *vehicle control system* en *power supply system*) en deze weer in sub-deelsystemen (*car body, battery*). De onderzoekers koppelden deze sub-deelsystemen met risicofactoren, zoals *human factors* en *environmental factors*, welke ook weer onderverdeeld zijn in sub-risicofactoren (*human illegal act, severe weather conditions*). De vijf belangrijkste geïdentificeerde risicofactoren zijn gegeven in de volgende tabel:

Tabel 3-7 Risicofactoren elektrische auto [Ref 26.]

| Ranglijst | Risicofactoren |
|-----------|-----------------------------|
| 1 | Brand door botsingschade |
| 2 | Batterijkwaliteitsfouten |
| 3 | Modificatie door derden |
| 4 | Waterschade aan de batterij |
| 5 | Falen van oplaadapparatuur |

Diaz et al. (2020) noemen dat statistieken met betrekking tot de veiligheid van elektrische voertuigen uitwijzen dat in 80% van de brandgevallen spontane ontbranding de oorzaak is, hierbij wijzend op thermal runaway door batterij-falen [Ref 15.].

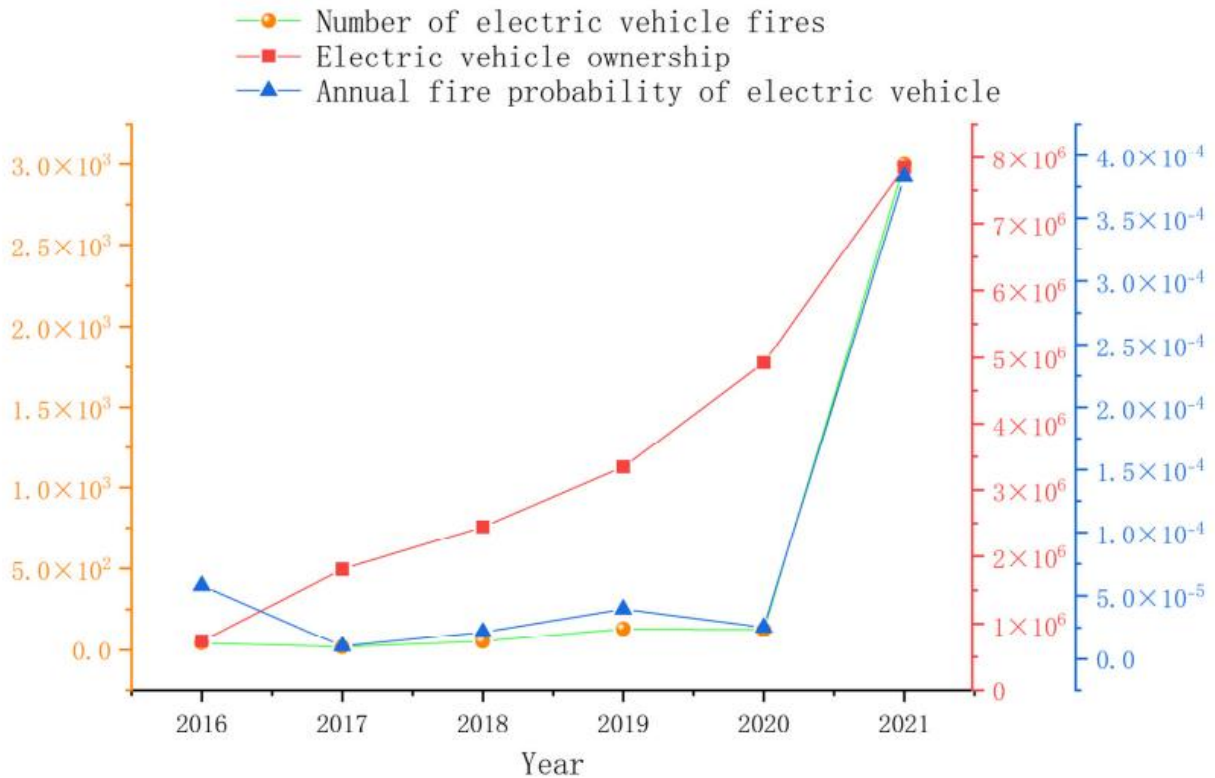
Ook Sun et al. (2020) noemen dat, in het geval van batterij-falen, de meest voorkomende oorzaak thermal runaway is. Verder benoemen de onderzoekers het gegeven dat er nog relatief weinig oude elektrische auto's zijn. Die uitspraak doen zij, omdat is gebleken dat branden in reguliere brandstofauto's voornamelijk voorkomen bij oudere voertuigen. Deze overweging, en de overweging dat het marktaandeel elektrische auto's aanzienlijk zal toenemen, waren voor Sun et al. aanleiding om een toename van het aantal elektrische autobranden te voorspellen [Ref 21.].



Figuur 3-5 Verwachte toename elektrische autobranden Australië [Ref 28.]

Bestaande data wijst uit dat de frequentie van elektrische autobranden wereldwijd in het algemeen lager ligt dan reguliere autobranden. In de Verenigde Staten zijn er jaarlijks 55 elektrische autobranden, vergeleken met 284.130 reguliere autobranden. In Australië zijn er gemiddeld 6 branden op 1 miljoen elektrische auto's en gemiddeld 2130 branden op 1 miljoen (alle soorten) auto's. Een verwachting van de toename van elektrische autobranden in Australië is in figuur 11 te zien [Ref 30.]

China geeft een ander beeld. Uit analyse van gegevens over de periode 2016 tot 2021 komt een gemiddelde van 89 autobranden per 1 miljoen elektrische auto's naar voren. In 2021 bleek in China de kans op een elektrische autobrand zelfs groter dan brand in een conventionele auto (0.0383% versus 0.01-0.02%). De toename is te zien in Figuur 3-6 [Ref 26.].



Figuur 3-6 Statistieken China 2016-2021 [Ref 26.]

Pearl of Scandinavia

Hoewel de grote branden op de Fremantle Highway en de Sincerity Ace vaak genoemd worden, is slechts één ongevalsrapport gevonden waarbij sprake was van een brand ontstaan in een elektrische auto aan boord van een autoschip.

Op 16 november 2010 vertrok de Pearl of Scandinavia uit Oslo op weg naar Kopenhagen. De volgende dag, om 06:00 uur in de morgen, activeerde het brandalarm als gevolg van een brand in diverse voertuigen achter op het bakboord autodek. Na een kwartier activeerde de bemanning handmatig het sprinklersysteem van het schip. De bemanning wist daarmee de brand te controleren en te blussen, waarna het brandteam aan boord, samen met ingevlogen Zweedse brandweereenheden, het vuur geheel doofde. Er waren geen gewonden en het schip bereikte haar bestemming op eigen kracht.

Na onderzoek bleek de brand te zijn ontstaan in het batterijpakket van een elektrische auto dat al gedurende 13 uur aan een laadkabel lag. Onderzoek naar de kabel wees uit dat daar geen kortsluiting in was ontstaan. Hoe de brand in het batterijpakket was ontstaan is onbekend gebleven [Ref 31.].

3.5 Preventieve en mitigerende maatregelen

Preventieve en mitigerende maatregelen dienen aan te sluiten op de brandeigenschappen van een elektrische auto. Uit voorgaande hoofdstukken is in ieder geval gebleken dat met betrekking tot elektrische autobranden mitigerende maatregelen zich moeten richten op vroege branddetectie en het klein houden van de brand.

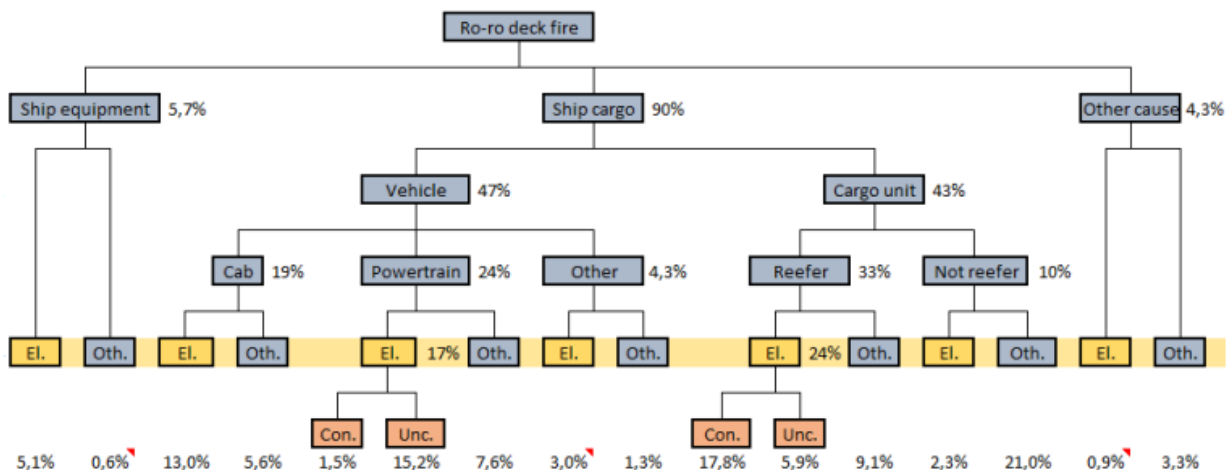
Voor preventieve maatregelen zijn er verschillende uitgangspunten: preventieve maatregelen om het ontbrandingsrisico zoveel mogelijk weg te nemen en preventieve maatregelen om snelle vuurverspreiding en brandontwikkeling te voorkomen. Navolgende sub-paragrafen beschrijven mogelijke maatregelen zoals deze zijn benoemd in verschillende projecten.

3.5.1 Oorzaak van brand aan boord van autoschepen

Carvallo et al. (2021) (LASH FIRE D04.1) noemen dat het autoschip zelf, haar toerusting en uitrusting, zelden zelf de oorzaak van een brand blijkt. Het is voornamelijk de lading die verantwoordelijk is voor het ontstaan van brand. Daarbij blijken elektrische fouten in 60% van de gevallen uit de LASH FIRE-database de boosdoener, waarbij vooral koelunits op vrachtwagens en vrachtwagentrailers het meest brandgevaarlijk zijn.

Elektrisch falen vormt ook een brandrisico voor een normale brandstofauto. Daarbij is niet gebleken dat de kans op elektrisch falen in een elektrische auto groter is dan in een reguliere brandstofauto. Hierbij dient opgemerkt te worden dat elektrische auto's over het algemeen nieuwer zijn dan reguliere brandstofauto's, en dat de voornoemde statistieken niet zijn uitgesplitst in stationair en rijdend. Verder onderzoek is nodig om te bepalen of de toename van elektrische auto's ook meer branden aan boord van autoschepen zal veroorzaken [Ref 25.].

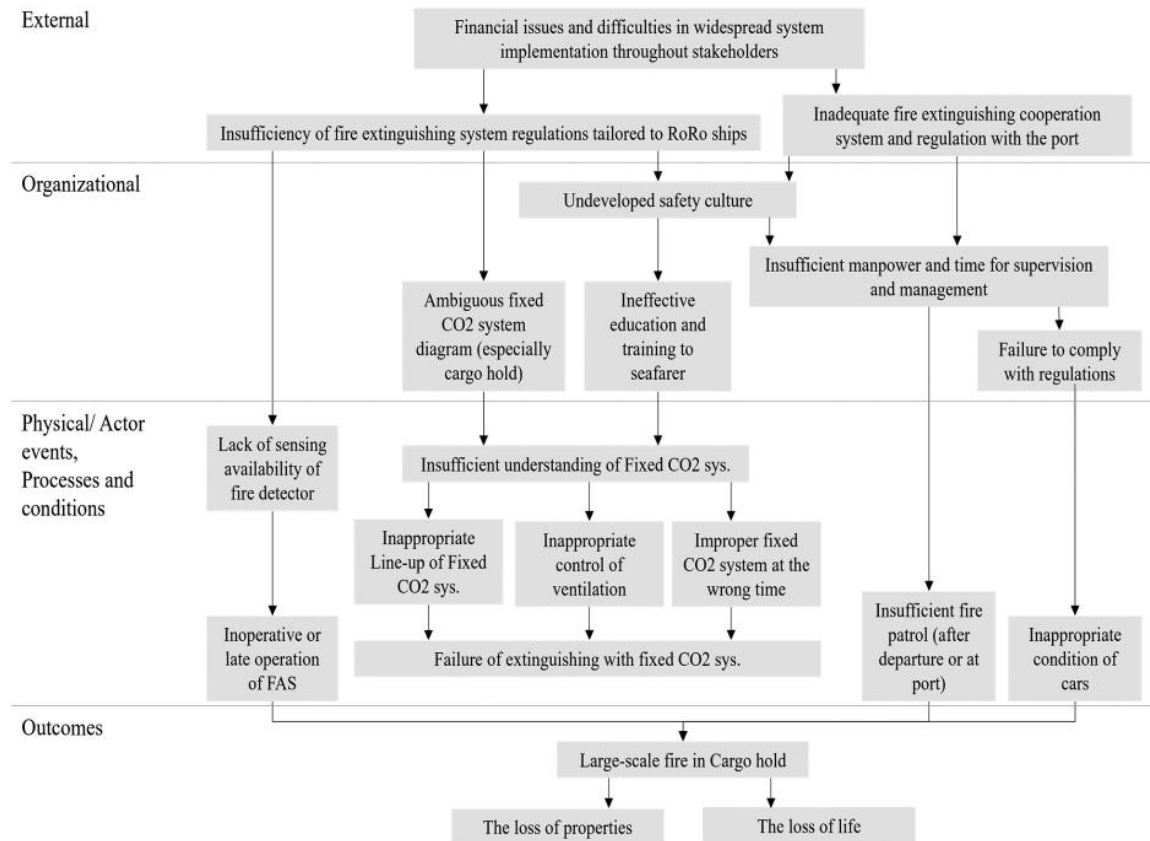
In Figuur 3-7 staan de afkortingen 'con.' en 'unc.' voor 'connected' en 'unconnected' aan het scheeps-elektrische systeem. Elektrisch (El.) staat hierin niet voor de elektrische auto, maar voor een elektrische fout als bronoorzaak voor een brand. Ook conventionele auto's kennen elektrische systemen, bijvoorbeeld de 12-volt accu.



Figuur 3-7 Firesafe I: Fault Tree Risk Model gebaseerd op 140 ongevallen tussen 1994 – 2016

Van de 140 ongevallen uit de Firesafe-database zijn er 24 te wijten aan de aandrijflijn van een voertuig. Twee van deze voertuigen waren gekoppeld aan het boordnet. Dit zijn gegevens tot en met 2016.

De onderzoekers Kim en Jeon benaderen de oorzaak van branden in het autoruim met een andere methode: AcciMap. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 3-8. AcciMap is een methode van ongevallenanalyse ontwikkeld door Rasmussen (1997) [Ref 32.] met als doel om relaties tussen onder andere organisatorische factoren en uiteindelijke ongevallen bloot te leggen. Technisch falen en menselijk handelen in een socio-technisch systeem zijn onderdeel van de methode.



Figuur 3-8 AcciMap [23]

Het onderzoek benoemt, na analyse van verschillende Zuid-Koreaanse ongevalsrapporten, als belangrijkste brandoorzaak het opladen van tweedehands voertuigen en daarbij specifiek defecten met de bekabeling en/of batterijen. Het voor langere tijd stilstaan op een haventerrein en dan plots weer in werking zetten van de aandrijving om aan boord te kunnen rijden, kunnen deze defecten veroorzaken. Verder is, in lijn met het Firesafe-onderzoek, gewezen op brand ontstaan in apparatuur in gebruik voor het van stroom voorzien van reefer-units op koel(vracht)wagens.

De onderzoekers benadrukken dat hoewel auto's bestemd voor het vervoer op autoschepen uitgezonderd zijn van de IMDG-code, dit alleen onder bepaalde voorwaarden geldt. Deze voorwaarden worden niet altijd gecontroleerd door de bemanning; hiervoor is vaak niet genoeg tijd en niet genoeg personeel.

Het onderzoek noemt daarnaast drie oorzaken voor het in de praktijk tekortschieten van vaste brandblusinstallaties aan boord:

- in het geval van CO₂ als blusmiddel blijkt het lastig om de betreffende ruimte goed luchtdicht af te sluiten;
- er is gebrek aan juiste kennis om CO₂ toe te passen op autoruimen;
- men weet niet wanneer de vaste brandblusinstallaties in te schakelen. Wanneer initiële bluspogingen door een blusteam falen, is het vaak te laat en te lastig om vooral een vaste CO₂-blusinstallatie goed te laten werken.

Tenslotte wijzen onderzoekers op het feit dat personeel vaak eerder de brand ontdekt dan de branddetectiesystemen. Voor het alarm afgaat is brand al enigszins ontwikkeld. Dit is van belang omdat een brand in een auto waarbij rook en vlammen zichtbaar zijn, al significant is en daardoor lastiger te bestrijden is. Dit vanwege de vele brandbare materialen in een auto, de hitte-uitstraling en in geval van de batterij van een elektrische auto, de moeilijk tot niet te doven batterij.

Wanneer branddetectiesystemen niet adequaat genoeg blijken te zijn voor vroege branddetectie, dan kunnen brandwachten de oplossing zijn. Daarvoor moeten dan wel voldoende bemanningsleden aan boord beschikbaar zijn voor deze taak [Ref 25.].

3.5.2 ELBAS-project

Het ELBAS-project is een grootschalig onderzoek naar nieuwe technologieën en methoden om elektrische autobranden aan boord van schepen te bestrijden. Het is uitgevoerd door het *Danish Institute of Fire and Security Technology* en was afgerond in 2022 [Ref 33.].

Blusmiddelen

Een vast blusinstallatiesysteem zoals een drencher- of watermistsysteem, bleek goed in staat te zijn een elektrische autobrand te bestrijden. Het water had een algeheel koelend effect en verminderde de rook. Het hielp zo mee de brand te beperken en vuurverspreiding te voorkomen. Hoe sneller de bemanning de sprinklerinstallatie inschakelt, hoe effectiever de installatie bijdraagt aan het bestrijden van de brand.

Ook draagbare blusmiddelen met water, zoals watermistgordijnen en onderstel-koeling, hielpen goed om het uitbreiden van een brand te voorkomen. Deze blusmiddelen sluiten het voertuig als het ware in en zijn daarom alleen inzetbaar als de brand in omvang nog zeer beperkt is. Deze middelen koppelt men eenvoudig aan gangbare brandslangen. Voor effectief gebruik is wel voldoende manoeuvreerruimte tussen de op het autodek opgestelde voertuigen nodig.

Ook losse blusmiddelen, zoals branddekens en gerichte batterijblusmiddelen zijn beoordeeld. Hieruit blijkt dat deze losse blusmiddelen van toegevoegde waarde kunnen zijn in het bestrijden en klein houden van een elektrische autobrand. Het probleem echter is dat de effectiviteit van deze middelen zeer situatie gebonden zijn en veel vaardigheid vereisen van de gebruiker. Een branddeken is niet gemakkelijk met twee personen over iedere auto te krijgen, vooral als auto's ook dicht tegen elkaar geparkeerd staan en/of een dakkoffer hebben. Middelen die een batterij direct koelen of blussen zijn pas inzetbaar als andere delen van de auto niet meer branden. Ook hier is de bereikbaarheid van groot belang. Deze blusmiddelen zijn vooral van nut in een latere fase van de brandbestrijding, waarbij alleen nog de batterij in brand staat en langdurige koeling met water noodzakelijk is.

De onderzoekers benoemen ook het inschakelen van de ventilatie. In sommige gevallen kan het in de bestrijding helpen om de rookgassen uit het door brand getroffen autoruim te verdrijven. De effectiviteit hiervan blijkt situatie-, ruim- en scheepsafhankelijk. Bovendien kan het ook extra zuurstof aan de brand toevoegen waardoor het mogelijk niet het juiste middel is wanneer er, buiten de batterijen, ook nog andere objecten in brand staan.

Vooraf het gebruik van een combinatie van brandblussystemen blijkt effectief: allereerst het inschakelen van het vaste sprinklersysteem en daarnaast of daarna het gebruik maken van manuele brandbestrijdingsmiddelen.

Training en risicobeoordeling

Uit het ELBAS-onderzoek komt een advies naar voren voor meer realistische brandoefeningen voor de bemanning. Deze moeten onder meer bestaan uit oefenen met situaties die zo realistisch mogelijk een autobrand op een autodek nabootsen. Het juiste gebruik van persoonlijke beschermingsmiddelen (PPE, *Personel Protective Equipment*) en het juiste afhandelingsproces na een brand moeten hierbij bijzondere aandacht verdienen.

De onderzoekers moedigen daarnaast aan om te oefenen samen met brandweerlieden vanaf de wal. Dit moet kennisuitwisseling bevorderen. De brandweer aan wal is niet altijd goed bekend met de wijze van brandbestrijding aan boord van schepen.

Tenslotte dienen op grond van de International Safety Management-code⁹ (ISM-code) alle operationele risico's aan boord te zijn beschreven. Omdat de toename van het transport van elektrische auto's voor veranderende brandrisico's zorgt, dient dit onderdeel te zijn van de periodieke herbeoordeling van het veiligheidsmanagementsysteem aan boord.

Bij deze maatregelen dient men in acht te nemen dat, volgens de ELBAS-onderzoekers, schepen met steeds minder bemanning varen. Dit heeft zijn weerslag op het aantal beschikbare mensen bij een brand, vooral bij het gebruik van specialistische middelen. Dit kan leiden tot steeds meer afhankelijkheid van de brandweer aan wal.

3.5.3 Firesafe I & II- en LASH FIRE-projecten

Firesafe I

Het Firesafe I-rapport richt zich op zogenaamde *Risk Control Options* (RCO's). De betreffende gevonden risico's zijn gegeven in Figuur 3-7. Hierbij is *electrical fire as ignition risk* als een primair risico beoordeeld. Eén van de preventieve RCO's van toepassing op elektrische auto's is om alleen auto's toe te staan op te laden op door de bemanning aangewezen plaatsen.

Andere preventieve voorstellen zijn maatregelen die zich vooral op de bemanning richten. Hierbij gaat het om bewustzijn creëren op het herkennen van risicovolle lading en symptomen van een aanstaande brand, welke in dit voorstel niet per se elektrisch van aard hoeven te zijn. Dit moet vorm krijgen in procedures, werkinstructies, handleidingen en waarschuwingsposters. Daarnaast moeten deze elementen onderdeel zijn van het brandveiligheids-instructieboekwerk, dat verplicht in de scheepsaccommodatie permanent toegankelijk moet zijn voor alle opvarenden. Zoals in SOLAS II-2/16.2 staat omschreven:

SOLAS II-2/16.2 Fire safety operation booklets

2.1. The required fire safety operational booklet shall contain the necessary information and instructions for the safe operation of the ship and cargo handling operations in relation to fire safety. The booklet shall include information concerning the crew's responsibilities for the general fire safety of the ship while loading and discharging cargo and while underway. Necessary fire safety precautions for handling general cargoes shall be explained.

De onderzoekers stellen een warmtebeeldcamera als hulpmiddel voor brandwachten voor. Door middel van infraroodstraling kunnen deze draagbare camera's hittebronnen detecteren. Ook bewakingscamera's zijn te gebruiken als detectiehulpmiddel en kunnen bovendien bijdragen aan het bevestigen van de activering en juiste werking van (vaste) brandblusinstallaties.

Naast preventieve maatregelen staan in het Firesafe I-rapport mitigerende maatregelen omschreven. Deze zijn gebaseerd op een analyse van brandincidenten uit verschillende ongevallendatabases. Een van de belangrijkste RCO's die genoemd wordt voor succesvolle brandbestrijding is het snel activeren van het drencher-systeem. Het is belangrijk dat dit blussysteem van afstand kan worden ingeschakeld, waaronder vanuit de controlekamer in de machinekamer en vanaf de brug. Hiervandaan moet ook de juiste dek-sectie geactiveerd kunnen worden. Procedures en training zijn vervolgens genoemd als een belangrijke stap om het systeem effectiever te laten werken. Dit onderstrepen de bepalingen 14, 15 en 16 van SOLAS II-2, met als voorbeeld bepaling 15:

⁹ De ISM-code is een onderdeel van het SOLAS-verdrag:

SOLAS II-2/15

2.2.1. *Crew members shall be trained to be familiar with the arrangements of the ship as well as the location and operation of any fire-fighting systems and appliances that they may be called upon to use.*

2.2.3. *Performance of crew members assigned fire-fighting duties shall be periodically evaluated by conducting on-board training and drills to identify areas in need of improvement, to ensure competency in fire-fighting skills is maintained, and to ensure the operational readiness of the fire-fighting organization.*

Tenslotte besteden de onderzoeken aandacht aan het verminderen van rookverspreiding en beperken van de zuurstoftoevoer van zuurstof met behulp van brandkleppen. Deze kunnen van een open een gesloten ro-ro-ruimte maken.

Firesafe II

In het Firesafe II-rapport zijn maatregelen verder uitgesplitst en uitgediept. De eerste werkgroep (Firesafe II – Detection & Decision) identificeerde drie maatregelen die betrekking hadden op het detecteren van brand:

- Gecombineerde hitte- en rookdetectie, met daarbij in acht te nemen dat hitesensors sommige branden eerder detecteren en dat rookmelders soms tijdens laden en lossen zijn uitgeschakeld (in verband met uitlaatgassen van voertuigen).
- Het sluiten van bepaalde openingen in open ro-ro-ruimten; openingen kunnen luchtstromen veroorzaken die de hitte en rook van een beginnende brand kunnen overstemmen en vervagen, waardoor de bemanning of branddetectiesystemen de brand later opmerken.
- Bemanningsleden moeten vaker een brandronde lopen. Hoe vaker een bemanningslid door een ruimte loopt, hoe groter de kans op ontdekking van een beginnende brand.

De werkgroep identificeert ook drie maatregelen met betrekking tot de besluitvormingsfase in het brandbestrijdingsproces:

- Een betere *human machine interface* voor alarmsystemen. Het moet zo ontworpen zijn dat het lokaliseren van de brand mogelijk is op basis van onmiddellijke, precieze en beschikbare informatie.
- Betere routeringsmarkering aan boord van schepen. Een brandverkenningseenheid aan boord moet weten welke route het veiligst is.
- Procedureel vastleggen wie een drencher-systeem inschakelt en wanneer, om eventuele weerstand en angst hertegen weg te nemen (voor zover al niet onderdeel van de brandbestrijdingsprocedures aan boord).

Een tweede werkgroep keek naar *Containment & Evacuation*. In het kader van dit onderzoek zijn alleen de twee RCO's ter bevordering van de brandbeheersing genoemd:

- Na detectie zoveel mogelijk openingen in een open ro-ro-ruimte sluiten om de verspreiding van rook en vuur tegen te gaan.
- Vaste brandblussystemen installeren op het bovendek (*weather deck*). Hier wordt specifiek het gebruik van waterkanonnen genoemd, bij een gebrek aan andere vaste brandblussystemen om te koelen.

Werkgroep 3 heeft onderzoek gedaan naar alternatieve vaste brandblussystemen, zoals onder andere schuimwater en *Compressed Air Foam Systems* (CAFS). De conclusie was dat water het meest effectief is. Het drencher-systeem uitgevoerd volgens circulaire MSC.1/Circ.1430 van de IMO presteerde superieur aan de andere systemen.

Ten slotte richtte werkgroep 4 zich gericht op branddetectie. Hieruit kwamen twee systemen als veelbelovend naar voren:

- *Fibre optic linear heat detection* voor open ro-ro-ruimten. Dit is een detectiesysteem dat niet afhankelijk is van bepaalde meetpunten, maar dat hitte kan registreren over de gehele lengte van de sensor, in dit geval een lange kabel.
- Warmtebeeldcamera's voor op het bovendek.

LASH FIRE

Maatregelen tegen brand die door de Firesafe-rapporten in kaart zijn gebracht, zijn door de LASH FIRE-werkgroepen verwerkt tot richtlijnen. Het betreft de volgende vijf richtlijnen, welke vervat zijn in korte documenten met bullet points, met het karakter van algemene aanwijzingen:

- *Improvement in current signage and marking standards/conditions;*
- *Guidelines for crew-centered fire safety design;*
- *Guidelines for quick manual screening of Cargo Fire Hazards and Fire Patrols;*
- *Guidelines for effective first response;*
- *Guidelines for firefighting gear, equipment and tactics considering APV.*

In de laatste richtlijnen, waarin APV staat voor *Alternative Powered Vehicle*, staat over 'manual firefighting tacticts' bijvoorbeeld de aanwijzing: "*Most fires do not involve battery or gas tank, so first response can be performed as usually*".

Daarnaast zijn er door de verschillende werkgroepen relevante aanbevelingen gegeven. Met betrekking tot het opladen van de batterijen van elektrische auto's:

- Houdt rekening met elektrische isolatie, aarding en bescherming tegen kortsluiting;
- Ontwikkel veiligheidsprocedures voor het omgaan met oplaadapparatuur;
- Installeer controle- en monitoringssystemen om het oplaadproces te bewaken. Deze systemen kunnen temperaturen en overbelasting in de gaten houden.

Deelrapport D06.8 doet verslag van het toepassen van verschillende manuele brandbestrijdingsmiddelen bij een brandproef waarbij een elektrische auto, omringd door acht conventionele auto's, tot thermal runaway werd gebracht. Dit was een poging om brand op een ro-ro-dek na te bootsten, met als afwijkende factor dat de onderzoekers de proef in de open lucht uitvoerden. De conclusie luidde dat manuele brandbestrijding altijd het veiligst is in te zetten in combinatie met of na het gebruik van het drencher-systeem. Vanuit het perspectief van een brandbestrijder is een auto moeilijk te herkennen als een elektrische auto of als een brandstofauto.

Bij de brandproef zijn er ook weinig verschillen in hitte, (giftige) rookontwikkeling en gebrek aan zicht waargenomen. Wel vermeldt het onderzoek dat thermal runaway extra gevaarlijk is en dat bij brand de bemanningen met dit risico rekening moeten houden

Het deelrapport beschrijft verder een aantal belangrijke symptomen van een (beginnende) brand in een autobatterij, veroorzaakt door thermal runaway:

- 'popping'-geluiden;
- plotselinge temperatuursverhoging van de batterij;
- een brandlucht uit de batterij, en:

- rookdampen rondom de batterij. Wanneer er sprake is van veel rook maar nog geen vuur, dan is er waarschijnlijk sprake van een thermal runaway.

De bevindingen over de toepasbaarheid van verschillende geteste brandblusmiddelen, zoals een vuurdeken, een watermiststelsel en normale waterslangen, waren in lijn met de uitkomsten van het ELBAS-rapport. De blusmiddelen kunnen zeker helpen, maar vergen specifieke vaardigheden en zijn per situatie verschillend.

Tenslotte constateert deelrapport D06.8 dat de verplichte minimum trainingseisen voor de Advanced Firefighting-cursus van het STCW geen competenties vereisen met betrekking tot de bestrijding van branden in alternatieve brandstofvoertuigen. Het rapport deelt het volgende voorstel voor aanvullende competenties:

Tabel 3-8 Voorstel STCW Advanced Firefighting

| Competence | Knowledge, understanding and proficiency | Methods for demonstrating competence | Criteria for evaluating competence |
|---|--|--|---|
| Identify the hazards associated with carriage and charging of electric cars | Ability to identify electric battery vehicles and establish cargo separation procedures. Knowledge of possible consequences of overcharging, fast charging, charging damaged battery. Knowledge of the procedures to charge on board electric cars, risks associated and possible mitigation actions | Assessment of evidence obtained from approved training and/or instruction | Quantitative Risk assessment to estimate the likelihood of fire or thermal runaway when electric cars are loading on board |
| Organize and control methods and equipment for APV firefighting operations on board ro-ro spaces | Basic knowledge on suppression systems needed in case of AFV firefighting operations on board ro-ro spaces. Ability to perform firefighting technics and tactics regarding AFV fires | Assessment of evidence obtained from approved training by practical demonstration, shipboard training drill or instruction | Correct installation of cooling devices for the attenuation of radiant heat with the aim of producing a blockage effect Correct selection of the right manual firefighting tactic (defensive or offensive) depending on how the fire can be reached considering fire size and potential dangers |

3.5.4 Aanvullende bronnen

Meerdere in andere hoofdstukken genoemde bronnen geven aanvullende maatregelen over preventie en bestrijding van een elektrische autobrand. Deze variëren in mate van detail: sommigen bieden heel algemene oplossingen, anderen proberen maatwerk te leveren. Hieronder volgt informatie uit deze bronnen.

Kim en Jeon (2023) leggen de nadruk op het controleren van de staat van de te vervoeren voertuigen, het verbeteren van de vaste brandblusinstallaties en betere detectiesystemen en brandpatrouilles [Ref 25.]. Bao et al. (2023) leggen de nadruk op maatregelen voor het voorkomen van brand door menselijk handelen, zoals iemand die rookt, of in zijn auto blijft zitten tijdens een overtocht [Ref 24.].

De risicoanalyses die een elektrische autobrand in het algemeen behandelden, kwamen weer met geheel andere preventieve maatregelen. Om het brandrisico door botsingschade te mitigeren stelde men betere botsingbescherming en botsingdetectiesystemen voor. Daarnaast moet het ontwerp van de batterij en het batterijmanagementsysteem steeds aan verbetering onderhevig blijven om thermische reacties zoveel mogelijk te voorkomen. Ook wordt de bal bij de voertuigbestuurder en bij de overheid gelegd. De overheid moet algemene veiligheidsstandaarden ontwikkelen. Voertuigbestuurders moeten verantwoord rijden en verantwoord met de laadapparatuur omgaan [Ref 26.].

In het geval van een batterijbrand blijft water het beste blusmiddel om te koelen. Hoewel conventionele blusmiddelen vrijwel niet in staat zijn thermal runaway te stoppen, kunnen ze het brandproces wel vertragen en de brand isoleren door de temperatuur zoveel mogelijk beperkt te houden [Ref 22.].

Blusmethoden gericht op het blokkeren van de zuurstoftoevoer zijn niet afdoende in het geval van een batterijbrand, aangezien de batterij tijdens de brand zijn eigen zuurstof creëert. Brandbestrijding moet daarom gericht zijn op vroege detectie, vermindering van de brandverspreiding en effectieve bestrijdingsprocedures. Bij dit laatste zijn er ook voorstellen voor een passend beladingsplan voor elektrische auto's. Tenslotte benoemen de onderzoekers het verhoogde risico bij het opladen van elektrische auto's [Ref 34.].

Enkele voorbeelden en uitspraken uit de praktijk

Bij de brand op de Pearl of Scandinavia was de combinatie van een sprinklersysteem en manuele brandbestrijding effectief om de brand te bestrijden.

Bij een brand op de Autobanner in de haven van Incheon in Zuid-Korea (2018) bleek de beperkte ruimte rondom de (conventionele) auto waarin de brand ontstond, de *first responder* te belemmeren bij het bestrijden van de brand met handblusmiddelen in het beginstadium van de brand. Nadat ook brandweerlieden vanaf de wal geen soelaas konden bieden activeerde de bemanning tevergeefs het CO2-systeem. Uiteindelijk waren 1368 personen betrokken in de hele keten van de brandbestrijding [Ref 35.].

“All it takes to prevent a catastrophe is one quick crew member with a fire extinguisher”, en “Drench, drench, drench” zijn uitspraken die gedaan zijn door bemanningsleden van autoschepen.

Ook bij het brandincident in 2010 op de Commodore Clipper beperkte de dicht opeengepakte voertuigen de brandbestrijders in het blussen. Daarnaast bleken er problemen bij het drenchen: men moest hiermee staken omdat niet bekend was wat de gevolgen waren voor de stabiliteit nadat de afvoeren verstopt raakten door rommel. Toch waren beide blusmethoden, manueel en vast, voldoende om de brand te bestrijden totdat professionele brandweerlieden de bestrijding overnamen. Het niet optimaal werken van het brandalarm belemmerde het vroegtijdig detecteren van de brand en daarmee een effectieve bestrijding in een vroeg stadium [Ref 36.].

4 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Dit hoofdstuk beschrijft, in de vorm van conclusies, de antwoorden op de gestelde onderzoeksvragen uit hoofdstuk 1.

Daarnaast formuleert MARIN, op basis van de conclusies, diverse aanbevelingen die richting kunnen geven aan zowel (inter)nationaal beleid als operationele maatregelen. Hoewel binnenvaart en ro-ro-schepen op binnenwateren in deze literatuurstudie buiten beschouwing zijn gelaten, kunnen conclusies en aanbevelingen daar waar nodig van toepassing zijn.

4.1 Conclusies

Op basis van de bevindingen in hoofdstuk 3, heeft MARIN de volgende conclusies geïdentificeerd:

Wat zijn de precieze brandeigenschappen van de elektrische auto, en in welke mate verschillen deze van de conventionele, met fossiele brandstof aangedreven auto?

- Brandbaarheid en brandbestendigheid zijn twee belangrijke eigenschappen van een brand. De brandbaarheid van een elektrische auto vergeleken met een conventionele auto kent verschillen en overeenkomsten.

De overeenkomsten zijn te vinden in de vuurlast van een auto. Bij het volledig afbranden is de totale afgegeven brandenergie voornamelijk in verhouding met het totale gewicht van de auto, en niet met de aard van de aandrijving en het type brandstof. De hoeveelheid in de auto opgeslagen aandrijfenergie is wel een bepalende factor. De materialen van carrosserie, chassis en interieur komen doorgaans overeen, ondanks het type voortstuwing, en zijn voor het grootste deel verantwoordelijk voor de vuurlast. Eén bron spreekt van meer brandbare materialen in een plug-in hybride auto. De gemeten maximale warmteafgiftesnelheid kwam bij beide type auto's, elektrisch en conventioneel, grofweg overeen.

Hiermee is de intensiteit van elektrische autobranden vergelijkbaar met die van conventionele autobranden. Er zijn echter verschillen in het tijdspad naar het punt van maximale warmteafgifte. Dit blijkt afhankelijk van de oorzaak en de plaats van de brand in de auto, waar bij de elektrische auto ook het ontwerp en de energiecapaciteit van de lithium-ion-batterij een factor is. Hoe snel een elektrische autobrand intensiveert, is dus afhankelijk van de brandoorzaak en van de batterij.

- Het ontstaan van steekvlammen is een typische brandkarakteristiek waarin de elektrische auto verschilt met een reguliere brandstofauto. Door deze steekvlammen kan een brand zich snel binnen en buiten de auto verspreiden. De steekvlammen komen vanuit de lithium-ion-batterij, wanneer de batterij te maken krijgt met thermal runaway. Dit is een ongecontroleerd zelf voedend proces, veroorzaakt door interne of externe schade.

Hoe vol de batterij geladen is en hoe deze is ontworpen, is van invloed op de ernst van de steekvlammen. De meeste onderzoekers zien de vuurverspreiding van elektrische autobranden daardoor van een grotere orde dan de vuurverspreiding van conventionele autobranden, hoewel er ook onderzoekers wijzen op het gevaar van weglekken van brandende vloeistoffen bij brandstofauto's.

- Eén van de opmerkelijkste verschijnselen die werd opgemerkt tijdens de brandproeven, was de vorming van witgrijze rookgassen in het geval van thermal runaway in de lithium-ion-batterij.

Nog voor vlammen zichtbaar zijn concentreert zich rook om en onder de auto. De zichtbare brand ontstaat veelal door het exploderen van de witgrijze rookgassen. Dit zorgt voor een extra gevaarstelling, met name in besloten ruimten zoals het ruim in een autoschip. In het geval van een brand in een batterij als gevolg van thermal runaway, is er meestal dus een lange aanlooptijd tot een daadwerkelijk zichtbare brand met het vermogen om zich snel om het voertuig te verspreiden.

- Naast steekvlammen en explosiegevaar onderscheidt de elektrische autobrand zich door de productie van meer en giftige stoffen die een gevaar kunnen vormen voor de brandbestrijder en het milieu. Hier is vooral waterstoffluoride van belang. Met normaal gebruik van ademluchtbescherming en beschermende kleding levert dit geen extra gevaar op. Onderzoekers benadrukken in algemene zin het belang van het voorkomen van inademen van alle rookgassen afkomstig van een (auto)brand.

Wat zijn de kansen op brand bij het vervoer van een elektrische auto in vergelijking met een conventionele, met fossiele brandstoffen aangedreven auto aan boord van een autoschip?

- Wanneer teruggeblikt wordt op statistieken van branden aan boord van autoschepen, komen er geen indicaties naar voren dat de kans op brand door een elektrische auto groter is dan door andere voertuigen, hoewel de meeste branden wel een elektrische oorzaak kennen. Het gaat dan voornamelijk om koel-units op koel(vracht)wagens en om de reguliere accu van brandstofauto's. Eén voorbeeld is gevonden: in 2010 ontstond op een veerboot tussen Oslo en Kopenhagen brand in een elektrische auto.
- Het zijn vooral veerboten (ro-ro-passagiersschepen) waar het vaakst brand ontstaat. Over alle autoschepen gezien ontstaat een brand het vaakst in voertuigen opgesteld op een afgesloten autodek. Hoewel er grote branden op autoschepen zijn geweest, zoals op de Fremantle Highway, blijkt uit statistieken dat de kans op brand per vervoerde auto gelijk is aan of zelfs een fractie lager is dan de kans op brand per vervoerde container.
- Statistieken die het brandrisico van auto's in het algemeen beschouwen, wijzen uit dat in elektrische auto's veel minder vaak brand ontstaat dan in reguliere brandstofauto's, hoewel in China in 2021 dat voor het eerst niet het geval was. Conventionele brandstofauto's zijn over het algemeen veel brandgevoeliger. Vooral de leeftijd van de auto speelt hierbij een rol. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de gemiddelde leeftijd van het elektrische wagenpark veel jonger is, maar dat dit niet automatisch betekent dat het elektrische wagenpark in de toekomst onveilig zal zijn: nieuwe technologie kan mogelijk met betere en veiligere ontwerpstechnieken de eventuele verhoogde risico's door veroudering verlagen.

Welke preventieve en mitigerende maatregelen kunnen het beste genomen worden om de kans op, en het gevolg van brand door een elektrische auto aan boord van een autoschip zoveel mogelijk te beperken?

- De kans op een elektrische autobrand in een autoruim wordt kleiner door risicovoertuigen op voorhand te weigeren. Risicovoertuigen zijn elektrische auto's waarvan de integriteit van de elektrische batterij niet meer te garanderen is. Dit kan bijvoorbeeld zijn door een botsing. Daarnaast wordt het risico verlaagd door de batterij van de elektrische auto's niet op te laden aan boord.
- De kans dat een kleine brand escaleert naar een grootschalige brand is groter naarmate de brand later ontdekt wordt en naarmate initiële vaste brandblusinstallaties falen. Het is daarom van belang dat, na detectie, onmiddellijk en zonder terughoudend de brandbestrijding start.
- Voor vroege inschakeling van brandbestrijdingssystemen is het daarom van cruciaal belang dat branddetectiesystemen effectief werken. Een combinatie van verschillende detectiemethoden lijkt daarmee het best, waaronder naast het toepassen van toegespitste rook- en hittedetectie het door de bemanning visueel en auditief controleren van de in het autoruim gestalde elektrische auto's. De verschillende typen ruimen vragen hierbij elk een eigen gerichte aanpak.
- Hierbij is het belangrijk de bemanning te trainen in het herkennen en bestrijden van een elektrische autobrand. Volgens de geldende SOLAS-voorschriften moet de bemanning weten welke specifieke gevaren er aan boord van het schip zijn ten aanzien van de brandveiligheid. Daarnaast moet de bemanning weten welke middelen en procedures het schip heeft om hier mee aan slag te gaan. Deze informatie moet up-to-date worden gehouden, vooral omdat het vervoer van elektrische voertuigen meer en meer toeneemt.

- Er is meer ondersteuning nodig voor de bemanning. Dat kan door het verbeteren en verduidelijken van looproutes aan boord tijdens de bestrijding van brand aan boord. Ook van belang zijn het aanscherpen van besluitvormingsprocessen met betrekking tot het activeren van brandbestrijdingsmiddelen en de beschikbaarheid van juiste hulpmiddelen zoals warmtebeeldcamera's.
- Om kennis bij de bemanning op voorhand te verbeteren is er vanuit het LASH FIRE-onderzoek een voorstel gedaan voor herziening van de STCW-cursus *advanced firefighting*. Het blijkt dat kennis over omgaan met elektrische autobranden nog niet specifiek onderwezen wordt.
- Deluge-sprinklersystemen, oftewel drencher-systemen zijn de beste methode om een elektrische autobrand aan boord van een autoschip te bestrijden. Hoe sneller dit systeem wordt ingeschakeld, hoe gemakkelijker het in staat is de brand klein te houden. Bij een elektrische autobrand is het van belang meteen het deluge-sprinklersysteem te activeren.
- Andere brandbestrijdingsmiddelen, zoals branddekens, waterlansen en brandslangen kunnen in een later stadium van toepassing zijn om de brand onder controle te houden. Veel van deze middelen vereisen gerichte training en zijn niet in elke situatie even effectief. Vaak is de brandhaard lastig te bereiken.

4.2 Aanbevelingen

MARIN komt, op basis van de conclusies, tot diverse aanbevelingen die richting kunnen geven aan zowel (inter)nationaal beleid als operationele maatregelen:

- Zet in op een herziening van de STWC-code met betrekking tot de *Basic Safety*- en de *Advanced Firefighting*-training, door in het curriculum zowel de theoretische als de praktische kennis van kenmerken en bestrijding van een lithium-ion-batterijbrand toe te voegen.
- Zet in op richtlijnen voor een goed deurbeleid bij autoschepen: het weigeren van beschadigde elektrische auto's, elektrische auto's met foutmeldingen, en elektrische auto's die in een periode van 24 uur voor het aan boord gaan een reparatie hebben ondergaan. Kortom, elektrische auto's moeten aantoonbaar volledig functioneel, zelf voortgedreven, schadevrij, in schone conditie en in veilige staat zijn.
- Zet in op richtlijnen voor het niet op het boordnet aansluiten van elektrische auto's.
- Zet in op richtlijnen met als doel het als zodanig herkenbaar maken voor het scheepspersoneel van elektrische auto's en de verschillende soorten daarvan, zoals de plug-inhybride auto en de *extended range* elektrische auto. Plaats elektrische auto's waar mogelijk bij elkaar in hetzelfde autoruim, zodat snel duidelijk is in geval van brand in welk ruim of sectie de juiste aanpak van brandbestrijding van toepassing is. Hierbij moeten bemanning en andere brandbestrijders alert zijn op het feit dat branddekens, lansen en andere mobiele brandblussystemen niet in alle gevallen het beoogde effect hebben, een hoog niveau van training vereisen en voor veilige toepassing zeer afhankelijk zijn van de beschikbare ruimte, de mogelijke aanwezigheid van explosieve gassen en giftige rook en de hitte-uitstraling van de brand.
- Zet in op richtlijnen voor zo snel mogelijke branddetectie, specifiek voor beginnende branden in lithium-ion-batterijen. Zet hierbij in op rookdetectie, thermische detectie en detectie door de bemanning. Hierbij moet de bemanning getraind zijn op het herkennen van thermal runaway en de hieruit volgende lithium-ion-batterijbrand.
- Zet in op richtlijnen voor adaptie van brandblussystemen waarbij, na branddetectie onmiddellijk en zonder terughoudendheid grote hoeveelheden water op- en onder de elektrische auto kan worden losgelaten en/of gespoten. Let hierbij op drainagesystemen met voldoende capaciteit, die dit water af kunnen voeren zonder gevolgen voor de scheepsstabiliteit.

- Zet in op het steeds evalueren van het brandgevaar van auto's met innovatieve andersoortige aandrijftechnieken dan conventionele auto's, in het licht van de verwachte toename van het transport van deze voertuigen en in het licht van de gevolgen van veroudering van de voertuigen en daarin geïnstalleerde batterijen.

REFERENTIES

- [Ref 1.] W. Barbosa *et al.*, “Electric Vehicles: Bibliometric Analysis of the Current State of the Art and Perspectives,” *Energies*, vol. 15, no. 2, p. 395, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15020395.
- [Ref 2.] “Electric car sales, 2012-2024 – Charts – Data & Statistics,” IEA. Accessed: Dec. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-car-sales-2012-2024>
- [Ref 3.] “Why the world’s biggest EV maker is getting into shipping,” MIT Technology Review. Accessed: Nov. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.technologyreview.com/2024/01/30/1087393/byd-shipping-electric-cars-china/>
- [Ref 4.] “Audiofragment: scheepsbrand begon in elektrische auto, kapitein vroeg om evacuatie,” RTL Nieuws & Entertainment. Accessed: Oct. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.rtl.nl/tv/fragmenten/video/5398524/audiofragment-scheepsbrand-begon-elektrische-auto-bemanning-kon-geen>
- [Ref 5.] “Zware explosie aan boord Fremantle Highway. Oorzaak of gevolg van vuurzee op rampschip?,” Dagblad van het Noorden. Accessed: Oct. 15, 2024. [Online]. Available: <https://dvh.nl/groningen/Zware-explosie-aan-boord-Fremantle-Highway.-Oorzaak-of-gevolg-van-vuurzee-op-rampschip-28698408.html>
- [Ref 6.] [6]M. Templier and G. Paré, “A Framework for Guiding and Evaluating Literature Reviews,” *Commun. Assoc. Inf. Syst.*, vol. 37, no. 1, Aug. 2015, doi: 10.17705/1CAIS.03706.
- [Ref 7.] A. W. Harzing, *Publish or Perish*. [Online]. Available: <https://harzing.com/resources/publish-or-perish>
- [Ref 8.] V. Cole and M. Boutet, “ResearchRabbit,” *J. Can. Health Libr. Assoc.*, vol. 44, no. 2, p. 43, Aug. 2023, doi: 10.29173/jchla29699.
- [Ref 9.] M. Lundh and L.-G. Malmberg, “Regulatory aspects of Electric Vehicles and Fire in Maritime RoRo/RoPax Transports – A pre-study,” 2024.
- [Ref 10.] V. Babrauskas and R. D. Peacock, “Heat release rate: The single most important variable in fire hazard,” *Fire Saf. J.*, vol. 18, no. 3, pp. 255–272, Jan. 1992, doi: 10.1016/0379-7112(92)90019-9.
- [Ref 11.] M. Arvidson, “10.4 – Large-scale validation of the new fire test standard for alternative fixed fire fighting systems,” R, Feb. 2023. Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: https://lashfire.eu/media/2023/03/LASH-FIRE_D10.4_Large-scale-validation-of-the-new-fire-test-standard-for-alternative-fixed-fire-fighting-systems-1.pdf
- [Ref 12.] [M. Arvidson and Ö. Westlund, “Water Spray Fire Suppression Tests Comparing Gasoline-Fuelled and Battery Electric Vehicles,” *Fire Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 3391–3414, Nov. 2023, doi: 10.1007/s10694-023-01473-w.
- [Ref 13.] A. Olofsson and J. Gregersson, “ReliS - Reliable Sprinkler,” Lighthouse Swedish Maritime Competence Centre, 2002. Accessed: Dec. 20, 2024. [Online]. Available: https://fudinfo.trafikverket.se/fudinfoexternwebb/Publikationer/Publikationer_005901_006000/Publikation_005919/ReliS_slutrapport.pdf
- [Ref 14.] Y. Cui, B. Cong, J. Liu, M. Qiu, and X. Han, “Characteristics and Hazards of Plug-In Hybrid Electric Vehicle Fires Caused by Lithium-Ion Battery Packs With Thermal Runaway,” *Front. Energy Res.*, vol. 10, Apr. 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.878035.
- [Ref 15.] L. B. Diaz *et al.*, “Review—Meta-Review of Fire Safety of Lithium-Ion Batteries: Industry Challenges and Research Contributions,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 167, no. 9, p. 090559, Aug. 2020, doi: 10.1149/1945-7111/aba8b9.

- [Ref 16.] Y. Cui, J. Liu, B. Cong, X. Han, and S. Yin, "Characterization and Assessment of Fire Evolution Process of Electric Vehicles Placed in Parallel," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 166, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.psep.2022.08.055.
- [Ref 17.] R. Yin *et al.*, "Risk analysis for marine transport and power applications of lithium ion batteries: A review," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 181, pp. 266–293, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.psep.2023.11.015.
- [Ref 18.] J. Gehandler *et al.*, *BREND 2.0 - Fighting fires in new energy carriers on deck 2.0*. 2022. Accessed: Nov. 04, 2024. [Online]. Available: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-59162>
- [Ref 19.] J. Hynynen, O. Willstrand, P. Blomqvist, and P. Andersson, "Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests," *Fire Saf. J.*, vol. 139, p. 103829, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.firesaf.2023.103829.
- [Ref 20.] S. Kang, M. Kwon, J. Yoon Choi, and S. Choi, "Full-scale fire testing of battery electric vehicles," *Appl. Energy*, vol. 332, p. 120497, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120497.
- [Ref 21.] P. Sun, R. Bisschop, H. Niu, and X. Huang, "A Review of Battery Fires in Electric Vehicles," *Fire Technol.*, vol. 56, no. 4, pp. 1361–1410, Jul. 2020, doi: 10.1007/s10694-019-00944-3.
- [Ref 22.] Q. Wang, B. Mao, S. I. Stoliarov, and J. Sun, "A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 73, pp. 95–131, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.pecs.2019.03.002.
- [Ref 23.] P. A. Christensen *et al.*, "Risk management over the life cycle of lithium-ion batteries in electric vehicles," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 148, p. 111240, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111240.
- [Ref 24.] J. Bao, Z. Bian, B. Li, Y. Li, and Y. Gong, "A Hybrid Approach for Quantitative Analysis of Fire Hazards in Enclosed Vehicle Spaces on Ro-ro Passenger Ships," *Sustainability*, vol. 15, no. 17, Art. no. 17, Jan. 2023, doi: 10.3390/su151713059.
- [Ref 25.] K. Kim and H. Jeon, "The causes and responses to cargo hold fire accidents in RoRo ships using AcciMap," *J. Int. Marit. Saf. Environ. Aff. Shipp.*, vol. 7, no. 4, p. 2274227, Oct. 2023, doi: 10.1080/25725084.2023.2274227.
- [Ref 26.] J. Chen, K. Li, and S. Yang, "Electric Vehicle Fire Risk Assessment Based on WBS-RBS and Fuzzy BN Coupling," *Mathematics*, vol. 10, no. 20, Art. no. 20, Jan. 2022, doi: 10.3390/math10203799.
- [Ref 27.] Leroux *et al.*, "Firesafe II Detection and Decision," 2018. [Online]. Available: <https://emsa.europa.eu/publications/reports/item/3424-firesafeii.html>
- [Ref 28.] webmaster, "CARGOSAFE." Accessed: Dec. 09, 2024. [Online]. Available: <https://emsa.europa.eu/containership-safety/cargosafe.html>
- [Ref 29.] "LASH-FIRE_D04.02_Ro-ro-space-fire-database-and-statistical-analysis-report_V05.pdf." Accessed: Dec. 09, 2024. [Online]. Available: https://lashfire.eu/media/2021/04/LASH-FIRE_D04.02_Ro-ro-space-fire-database-and-statistical-analysis-report_V05.pdf
- [Ref 30.] M. K. Hassan *et al.*, "Fire Incidents, Trends, and Risk Mitigation Framework of Electrical Vehicle Cars in Australia," *Fire*, vol. 6, no. 8, Art. no. 8, Aug. 2023, doi: 10.3390/fire6080325.
- [Ref 31.] "pearl-of-scandinavia-fire-on-17-november-2010.pdf." Accessed: Dec. 11, 2024. [Online]. Available: <https://dmaib.dk/media/8371/pearl-of-scandinavia-fire-on-17-november-2010.pdf>
- [Ref 32.] J. Rasmussen, "Risk management in a dynamic society: a modelling problem," *Saf. Sci.*, vol. 27, no. 2, pp. 183–213, Nov. 1997, doi: 10.1016/S0925-7535(97)00052-0.

- [Ref 33.] “The ELBAS Project - Electric Vehicle Fires at Sea: New Technologies and Methods for Suppression, Containment, and extinguishing of Battery Car Fires Onboard Ships,” Danish Institute of Fire and Security Technology, Hvidovre, 2022. Accessed: Dec. 20, 2024. [Online]. Available: [https://brandogsikring.dk/files/Pdf/FogU/ELBAS/DBI%20ELBAS%20Report%20-%20Full%20Final%20\(rev.%201\).pdf](https://brandogsikring.dk/files/Pdf/FogU/ELBAS/DBI%20ELBAS%20Report%20-%20Full%20Final%20(rev.%201).pdf)
- [Ref 34.] K. Węglarz, E. Złoczowska, and A. Krasuski, “PROBLEMS OF FIRE PROTECTION IN THE RO-RO SPACE OF ROLL-ON/ROLL-OFF SHIPS DURING AN ELECTRIC VEHICLE FIRE Part 1 Problem areas in fire protection of cargo decks of ro-ro ships in the context of an electric vehicle fire,” *Sci. Rep. Fire Univ.*, vol. 1, no. 90, pp. 109–129, Jun. 2024, doi: 10.5604/01.3001.0054.6256.
- [Ref 35.] “Marine Safety Investigation Report on the AUTO BANNER,” Korea Maritime Safety Tribunal, 2020. Accessed: Dec. 20, 2024. [Online]. Available: <https://maritimesafetyinnovationlab.org/wp-content/uploads/2021/12/Marine-Safety-Investigation-Report-on-AUTO-BANNERROK.pdf>
- [Ref 36.] “Report on the investigation of the fire on the main vehicle deck of Commodore Clipper while on passage to Portsmouth,” MAIB, Southampton, 2011. Accessed: Dec. 20, 2024. [Online]. Available: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/547c6fb0e5274a428d000037/CommodoreClipperReport.pdf>

MARIN
P.O. Box 28

6700 AA Wageningen
The Netherlands

T +31 317 49 39 11
E info@marin.nl

I www.marin.nl
   