

Brandexperiment over de inzet van
ultrahogedruk snij- en blussystemen
bij branden in batterijen van
elektrische voertuigen



Nederlandse Academie voor
Crisisbeheersing en Brandweezorg
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.nipv.nl
info@nipv.nl
026 355 24 00

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2024

| | |
|----------------|---|
| Auteurs | T. Hessels en H. Brans |
| Contactpersoon | T. Hessels |
| Opdrachtgever | Brandweer Nederland / Veiligheidsregio Haaglanden |
| Contactpersoon | W. Muijsson / R. Turkenburg |
| Datum | 26 november 2024 |
| Foto's: | NIPV, tenzij anders aangegeven |

Wij hechten veel belang aan kennisdeling. Delen uit deze publicatie mogen dan ook worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding.

Abstract

The number of electric vehicles in the Netherlands has grown rapidly in recent years and continues to increase. When the battery pack of these vehicles is involved in a fire or something goes wrong internally, the battery pack can go into a 'thermal runaway'. Fighting a thermal runaway is complex and, in addition, current deployment techniques are not always optimal. The aim of this research is to use fire experiments to determine whether an ultra high pressure (UHP) extinguishing system can be used safely and effectively, and is suitable for practical application, by the Dutch fire service in order to fight battery fires in electric vehicles. Nine questions were formulated for this research. They were answered through a preliminary study, consisting of a working visit, a literature review, and interviews. Additionally, two almost identical experiments were conducted, in which the battery pack of an electric car was put into thermal runaway.

It was found that it is practically feasible to deploy a UHP extinguishing system safely and effectively in the Netherlands to control or extinguish an unstable or burning battery pack in an electric vehicle, provided a number of specific safety measures are taken for this purpose. These safety measures are:

- > Deploying low-pressure jets (1) to suppress any jet fires from the battery pack, and (2) to shield the UHP operator to protect them from exposure to any such (unexpected) jet fires.
- > Determining that no flammable gases have accumulated in or around the vehicle. Busting the windows with the UHP extinguishing system, possibly supported by the use of fans, can help vent combustible gases.
- > Positioning the UHP operator and other fire personnel as far away as possible from the (toxic) smoke and flames.
- > Use of the long lance or extension of the UHP extinguishing system.

During the experiment, an effective deployment procedure was confirmed. This procedure consisted of identifying hot spots with a Thermal Imaging Camera, and then penetrating the battery pack and using the UHP extinguishing system to introduce water to these hot spots. Here, steam formation is an indicator that cooling is effective, and the transition from steamy to leaking water is an indicator that the deployment has been effective and can be terminated. After this, a period of visual monitoring is necessary to ensure that the situation has stabilised and there is no re-ignition. Participating fire personnel indicated that this deployment gave them a positive feeling and was relatively easy to carry out.

In conclusion, the results of the fire experiments provide sufficient confidence to have (specialised) UHP units within the Dutch fire service deploy UHP extinguishing systems in case of fires in the battery packs of electric vehicles.

An English version of the full report is available through our website.

Samenvatting

Het aantal elektrische voertuigen in Nederland is de afgelopen jaren sterk gegroeid en blijft toenemen. Wanneer het batterijpakket van deze voertuigen betrokken raakt bij een brand of als er intern iets misgaat, kan het in een zogeheten thermal runaway raken. Het bestrijden van een thermal runaway is complex, en bovendien zijn de huidige inzettechnieken niet altijd optimaal. Doelstelling van dit onderzoek is om met brandexperimenten vaststellen of een ultrahogedruk snij- en blussysteem (uhd-blussysteem) veilig, effectief en praktisch toepasbaar is voor de bestrijding van batterijbranden in elektrische voertuigen door de Nederlandse brandweer. Voor dit onderzoek zijn negen vragen opgesteld, die beantwoord zijn door middel van een vooronderzoek, dat bestond uit een werkbezoek, een literatuurstudie en interviews, en uit een tweetal vrijwel identieke brandexperimenten, waarbij het batterijpakket van een elektrische auto in thermal runaway werd gebracht.

Het blijkt dat het praktisch uitvoerbaar is om in Nederland een uhd-blussysteem veilig en effectief in te zetten voor de bestrijding van een instabiel dan wel brandend batterijpakket van een elektrisch voertuig, mits hiervoor een aantal specifieke veiligheidsmaatregelen worden getroffen. Deze veiligheidsmaatregelen zijn:

- > Het inzetten van lagedrukstralen (1) ter onderdrukking van eventuele fakkels uit het batterijpakket, en (2) ter afscherming van de uhd-bediener om die te beschermen tegen blootstelling aan die (onverwachte) fakkels.
- > Vaststellen dat er geen brandbare gassen zijn opgehoopt in of rondom het voertuig. Het kapot spuiten van de ramen met het uhd-blussysteem, eventueel ondersteund door het gebruik van ventilatoren, kunnen helpen om brandbare gassen te ventileren.
- > Positionering van de uhd-bediener en het ander brandweerpersoneel zoveel mogelijk uit de (toxische) rook en vlammen.
- > Gebruik van de lange lans of het verlengstuk van het uhd-blussysteem.

Tijdens het experiment is bevestigd dat er een effectieve inzetprocedure is, die bestaat uit het identificeren van hotspots met een warmtebeeldcamera, en het vervolgens penetreren van het batterijpakket en inbrengen van water met het uhd-blussysteem op de plaats van deze hotspots. Stoomvorming is hierbij een indicator dat koeling actief is en de overgang van stoomvormig naar weglekkend water een indicator dat de inzet effectief is geweest en kan worden beëindigd. Hierna is een periode van visuele monitoring noodzakelijk om er zeker van te zijn dat de situatie is gestabiliseerd en er geen herontsteking plaatsvindt. Door het deelnemende brandweerpersoneel is aangegeven dat deze inzet een positief gevoel heeft opgeleverd en relatief makkelijk is uit te voeren.

Concluderend bieden de resultaten van de brandexperimenten ons voldoende vertrouwen om uhd-blussystemen in te laten zetten door (gespecialiseerde) uhd-eenheden binnen de Nederlandse brandweer bij branden in het batterijpakket van elektrische voertuigen.

Voorwoord

BITET staat als afkorting voor BrandweerInzetTactieken EnergieTransitie. Maar veel belangrijker is waar de partners van BITET-consortium inhoudelijk voor staan. Het BITET-consortium heeft als doel bestaande inzetactieken op het gebied van zowel materiaal, materieel als tactiek te testen en te valideren als het gaat om nieuwe ontwikkelingen binnen de energietransitie. Waar nodig, ontwikkelt het consortium ook nieuwe kennis omtrent inzetactieken; die kennis is openbaar beschikbaar. Zoals voor veel maatschappelijke ontwikkelingen, maar zeker die aangaande de energietransitie, is het voor de veiligheid cruciaal dat publieke en private partijen kennis met elkaar delen. Het BITET initiatief gaat echter verder. Private partijen, de brandweer en het NIPV werken in het consortium namelijk nauw samen aan kennisontwikkeling.

Een belangrijke ontwikkeling op het gebied van de energietransitie is het batterij-elektrisch rijden. We weten dat instabiele batterijcellen die in thermal runaway raken een probleem vormen voor incidentbestrijding door de brandweer. We publiceerden als NIPV hierover al diverse rapporten waarin we op basis van een literatuurstudie en expert judgement inzetactieken beoordeelden ten opzichte van elkaar. Maar in BITET-verband zijn we nu een stap verder gegaan. We hebben praktijkproeven uitgevoerd met een van de in de praktijk toegepaste inzetactieken om een thermal runaway te stoppen, namelijk het ultrahogedruk snij- en blussysteem (uhd-blussysteem). Deze proeven hadden tot doel om te bezien of, en onder welke condities, deze inzetactieken in de Nederlandse context toepasbaar is.

Het realiseren van deze real-life proeven is een huzarenstuk geweest van alle betrokkenen. We hebben, met grote dank aan de leverancier van de voertuigen en de Duitse werkgroep VDA/VDIK 'Rescueing of people', twee elektrische MPV's met batterijpakketten gekregen. Brandweer Amsterdam Airport Schiphol heeft haar oefenplaats beschikbaar gesteld voor de proeven, de veiligheidsregio's Haaglanden en Utrecht hebben manschappen geleverd voor de daadwerkelijke inzet, brandweer Amsterdam-Amstelland heeft materieel en menskracht beschikbaar gesteld, Coldcut Systems heeft de manschappen getraind, en TATA Steel en de Gezamenlijke Brandweer hebben in de voorbereiding meegedacht over de proefopzet en de praktische uitvoering. En voor het gehele draaiboek, de dag zelf en de metingen hebben het RIVM en onze eigen onderzoekers bergen nuttig werk verzet. De financiële bijdrages van Brandweer Nederland en Veiligheidsregio Haaglanden hebben het mogelijk gemaakt de experimenten daadwerkelijk te realiseren.

Met de tomeloze energie van en het regelwerk door Floris en Tom zijn al deze partijen en hun mensen (meer dan vijftig op de proefdag zelf) onderdeel geweest van een voor mijn lectoraat – maar ik durf hier wel te zeggen: voor heel Nederland – uniek experiment. De resultaten zijn aansprekend, direct bruikbaar en praktisch uiterst relevant voor de incidentbestrijding en voor een veilige elektrificatie van de mobiliteitssector. Deze eerste succesvolle proeven smaken naar meer. En er zijn repressieve uitdagingen te over in de energietransitie. Met het BITET-consortium zijn we dan ook al bezig aan de ontwikkeling van een tweede set experimenten.

Nils Rosmuller

Lector Energie- en transportveiligheid

Inhoud

| | |
|---|-----------|
| Abstract | 3 |
| Samenvatting | 4 |
| Voorwoord | 5 |
| Inleiding | 9 |
| 1 Onderzoeksmethode | 11 |
| 1.1 Fase 1: Vooronderzoek | 11 |
| 1.2 Fase 2: Brandexperiment met twee elektrische voertuigen | 11 |
| 1.3 Fase 3: Analyse van de resultaten | 12 |
| 2 Systeembeschrijving elektrisch voertuig en uhd-blussysteem | 13 |
| 2.1 Elektrisch voertuig | 13 |
| 2.2 Thermal runaway | 14 |
| 2.3 Het bestrijdingsprobleem van elektrische voertuigbranden | 16 |
| 2.4 Huidige inzetacties | 16 |
| 2.5 Ultrahogedruk snij- en blussysteem | 17 |
| 3 Bestaande kennis en ervaring | 18 |
| 3.1 MSB en Coldcut Systems | 18 |
| 3.2 Tsjechië | 21 |
| 3.3 Kennishiaten met betrekking tot de Nederlandse context | 21 |
| 4 Voorbereiding en opzet brandexperiment Schiphol | 22 |
| 4.1 Methode initiëren thermal runaway | 22 |
| 4.2 Stroomgeleidingstesten | 24 |
| 4.3 Kapot spuiten van de ramen | 28 |
| 4.4 Testvoertuigen Brandexperiment Schiphol | 28 |
| 4.5 Deelnemende brandweerploegen | 30 |
| 4.6 Locatie | 31 |
| 4.7 Veiligheid en ethiek | 32 |
| 4.8 Tijdschema van de experimenten | 33 |
| 4.9 Omschrijvingen voor (visuele) waarnemingen tijdens het experiment | 34 |
| 5 Meetgegevens brandexperimenten Schiphol | 36 |
| 5.1 Brandexperiment 1 – ochtend | 36 |
| 5.2 Brandexperiment 2 – middag | 42 |
| 6 Analyse van de resultaten en antwoord op de onderzoeksvragen | 48 |
| 6.1 Veiligheid | 48 |
| 6.2 Effectiviteit | 50 |
| 6.3 Praktische toepasbaarheid in Nederland | 51 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6.4 | Beschouwing | 55 |
| 7 | Conclusie | 56 |
| 8 | Aanbevelingen voor handelingsperspectief uhd-inzet | 57 |
| 8.1 | Inleiding | 57 |
| 8.2 | Herkennen | 57 |
| 8.3 | Verkennen | 58 |
| 8.4 | Stabiliseren (van de werksituatie voor uhd-bedieners) | 59 |
| 8.5 | Bestrijden | 60 |
| 8.6 | Nazorg | 61 |
| 8.7 | Uhd-inzet in relatie tot andere inzettechnieken | 62 |
| | Referentielijst | 65 |
| | Bijlage 1: Methode thermal runaway | 67 |
| | Bijlage 2: Ethisch afwegingskader | 71 |
| | Bijlage 3: Tijdsverloop ochtend | 75 |
| | Bijlage 4: Tijdsverloop middag | 91 |

Inleiding

Aanleiding

Het aantal elektrische voertuigen (EV) in Nederland, waaronder volledig elektrische (BEV) en plug-in hybride (PHEV) voertuigen, is de afgelopen jaren sterk gegroeid en blijft gestaag toenemen. De Nederlandse overheid verwacht dat dit aantal tegen 2030 opgelopen zal zijn tot 1,9 miljoen (Rijksoverheid, z.d.). Hierdoor zal, als alle andere factoren gelijk blijven, ook het aantal branden met elektrische voertuigen toenemen.

De overgang van conventionele voertuigen (aangedreven door benzine en diesel) naar elektrische voertuigen brengt nieuwe en andere veiligheidsrisico's met zich mee, voornamelijk gerelateerd aan het lithium-ion batterijpakket in deze voertuigen. Wanneer dit batterijpakket betrokken raakt bij een brand of als er intern iets misgaat, kan het in een zogeheten thermal runaway raken. Dit is een ongewenste, exotherme reactie binnen de batterijcellen waarbij hitte, brandbare en toxische gassen vrijkomen. Een kenmerk van dit intrinsieke veiligheidsprobleem is dat een thermal runaway zichzelf in stand houdt, mede doordat de hitteproductie zichzelf versterkt.

Het bestrijden van een thermal runaway in het batterijpakket is complex, en bovendien zijn de huidige twee inzettechnieken niet altijd optimaal. De eerste methode, het onderdompelen van het batterijpakket in een dompelcontainer, is tijdrovend en produceert een grote hoeveelheid vervuild water. De tweede methode is het voertuig uit laten branden, maar dit is niet altijd veilig of wenselijk, afhankelijk van de omgeving.

Recent onderzoek uit Zweden heeft aangetoond dat een ultrahogedruk snij- en blussysteem (uhd-blussysteem) effectief kan zijn in het stoppen van de propagatie van een thermal runaway in het batterijpakket tijdens een elektrische voertuigbrand (MSB, 2023). Dit was aanleiding om door middel van twee brandexperimenten de geschiktheid van deze techniek binnen de Nederlandse brandweercontext te onderzoeken. Bij een positief resultaat zullen de bevindingen als basis dienen voor het opstellen van Nederlandse brandbestrijdingsinstructies en -procedures voor de inzet van deze blussystemen bij elektrische voertuigbranden waarbij de batterij betrokken is.

Doelstelling

Doelstelling van dit onderzoek is het met brandexperimenten vaststellen of een uhd-blussysteem **veilig, effectief** en **praktisch toepasbaar** is voor de bestrijding van batterijbranden in elektrische voertuigen door de Nederlandse brandweer.

- > Veilig: De brandweerlieden kunnen voldoende worden beschermd tegen de effecten van een thermal runaway en tegen elektrocutie.
- > Effectief: Er is een uhd-inzettechniek mogelijk waarmee een effectieve koeling wordt bereikt en de thermische propagatie wordt gestopt.

- > Praktisch toepasbaar in Nederland: De inzettechniek is praktisch uitvoerbaar door de uhd-eenheden in Nederland.

Onderzoeksvragen

Om de doelstelling van het onderzoek te bereiken, zijn de volgende onderzoeksvragen opgesteld en gerangschikt onder de thema's veiligheid, effectiviteit en praktische toepasbaarheid in Nederland. Onder uhd-inzet wordt verstaan 'de uhd-inzet op het batterijpakket in het geval van een elektrische voertuigbrand'.

Veiligheid

1. Hoe kan worden voorkomen dat brandweerpersoneel wordt blootgesteld aan onverwachte vlammen en fakkels tijdens de uhd-inzet?
2. Hoe kan een dampwolkexplosie worden voorkomen tijdens de uhd-inzet?
3. Hoe kan worden voorkomen dat brandweerpersoneel wordt blootgesteld aan toxische gassen tijdens de uhd-inzet?
4. Hoe kan worden voorkomen dat brandweerpersoneel wordt blootgesteld aan elektrocutierisico's tijdens de uhd-inzet?

Effectiviteit

5. Wat zijn geschikte penetratieplekken om een uhd-blussysteem in het batterijpakket te brengen en hoe lang moet het water worden ingebracht op een penetratieplek?
6. Wanneer is een veilige en stabiele situatie gecreëerd en kan het voertuig veilig worden overgedragen aan een bergingsbedrijf?

Praktische toepasbaarheid in Nederland

7. Hoe was het gevoel van de brandweerlieden over de uhd-inzet tijdens het experiment?
8. Hoe ervaren de brandweerlieden de moeilijkheidsgraad van de uhd-inzet tijdens het experiment?
9. Welke knelpunten hebben de brandweerlieden gedurende de uhd-inzet tijdens het experiment ervaren?

Afbakening

Er is gekozen voor het testen van uhd-blussystemen, omdat deze reeds in bezit zijn van diverse brandweerkorpsen in Nederland en worden toegepast bij andere typen incidenten. Wij zijn ons ervan bewust dat er diverse andere systemen op de markt zijn die eenzelfde doel nastreven – water direct in het batterijpakket injecteren – maar deze zijn nu nog niet in gebruik bij brandweerkorpsen in Nederland. Voor deze experimenten worden dus bestaande systemen getest voor een nieuw toepassingsgebied.

1 Onderzoeksmethode

1.1 Fase 1: Vooronderzoek

Alvorens het experimenteel plan voor de brandexperimenten op te stellen, is een vooronderzoek uitgevoerd. Dit had als doel om de reeds beschikbare kennis en ervaring met betrekking tot de inzet van uhd-blussystemen op elektrische voertuigbranden in beeld te brengen, met betrokken experts in Europa in contact te komen en een geschikte methode voor het initiëren van een thermal runaway te ontwikkelen. Op deze manier zijn de eerste zes onderzoeksvragen onderzocht. De resultaten hiervan hebben als input gediend voor de praktische opzet van het brandexperiment.

In deze fase is een werkbezoek gehouden, is een literatuurstudie uitgevoerd, en zijn interviews gehouden. Voor het werkbezoek heeft een onderzoeker van het NIPV in 2023 de autofabrikant bezocht die had aangeboden om twee elektrische voertuigen ter beschikking te stellen voor de brandexperimenten. Er zijn daar enkele try-outs gehouden op losse batterijmodules om een eerste gevoel te krijgen bij het toepassen van een uhd-blussysteem op batterijbranden; ook zijn betrokken experts met elkaar in contact gebracht.

Hierop voortbouwend hebben wij gesprekken gevoerd met brandweermensen in binnen- en buitenland die ervaring hebben met uhd-blussystemen om tot een brandweerinzet te komen. De inzetprocedure tijdens het experiment is vervolgens in samenspraak met de in te zetten brandweerploeg vastgesteld. Hiervoor zijn ook experts geraadpleegd van Coldcut Systems, een fabrikant van een uhd-blussysteem. De achtergrondinformatie uit het vooronderzoek vormde de basis van het plan voor de brandexperimenten. Tevens heeft het een geschikt kennisnetwerk opgeleverd om de voortgang en resultaten van ons onderzoek mee te delen en te bespreken.

In aanvulling hierop zijn twee try-outs (voorbereidende experimenten) gehouden door Veiligheidsregio Haaglanden om antwoord te geven op twee kennishiaten met betrekking tot de veiligheid die wij graag beantwoord wilden zien om de veiligheid gedurende de inzet van een uhd-blussysteem te garanderen.

1.2 Fase 2: Brandexperiment met twee elektrische voertuigen

Voor het brandexperiment hadden wij de beschikking over twee nieuwe elektrische voertuigen met een batterijpakket van 75 kWh. Hiermee hebben wij twee experimenten uitgevoerd. Het doel was om het batterijpakket van elk elektrisch voertuig in thermal runaway te brengen, zodat vlammen zouden ontstaan, en vervolgens het gehele voertuig in brand zou raken. Het was een vereiste dat het batterijpakket was betrokken bij de brand. Het gewenste scenario dat wij wilden nabootsen, was dat de elektrische voertuigbrand vanuit een thermal runaway in het batterijpakket ontstond. Hiertoe hebben wij met een mechanische beschadiging aan het batterijpakket de thermal runaway gestart. Vervolgens heeft de

brand tien minuten ontwikkeltijd gehad om zich uit te breiden tot het gehele voertuig. Om de situatie na een melding van een elektrische voertuigbrand in Nederland na te bootsen, is eerst een tankautospuiter ingezet om de voertuigbrand te blussen. Vervolgens is een specialistische brandweereenheid ingezet die de beschikking heeft over een uhd-blussysteem. Deze heeft als doel de thermische propagatie in het batterijpakket te stoppen en daarmee het batterijpakket te stabiliseren. Met het brandexperiment is de (theoretische) input uit het vooronderzoek in de praktijk getest en zijn onderzoeksvragen 7, 8 en 9 beantwoord.

1.3 Fase 3: Analyse van de resultaten

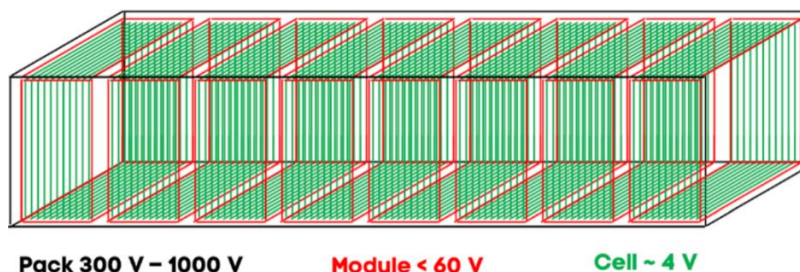
Na afloop van het brandexperiment zijn de resultaten geanalyseerd en is geëvalueerd of de inzettechniek met het uhd-blussysteem voldoende geschikt is binnen de specifieke context van de Nederlandse brandweer. Hierbij is gekeken naar de veiligheid, effectiviteit en praktische toepasbaarheid van de inzettechniek. Vervolgens zijn op basis van de resultaten voorstellen voor handelingsperspectieven voor het gebruik van een uhd-blussysteem bij incidenten met elektrische voertuigen gedaan; deze zijn besproken met het BITET-consortium.

2 Systeembeschrijving elektrisch voertuig en uhd-blussysteem

In dit hoofdstuk wordt een beknopte systeembeschrijving van een elektrisch voertuig gegeven en worden de effecten van een thermal runaway besproken. Hiermee wordt inzichtelijk waarom de bestrijding van een batterijpakket in thermal runaway als problematisch kan worden ervaren door incidentbestrijders. Ten slotte wordt de werking van een uhd-blussysteem uitgelegd, zodat duidelijk wordt waarom dit als een potentieel geschikt bestrijdingsmiddel in deze probleemcontext wordt gezien.

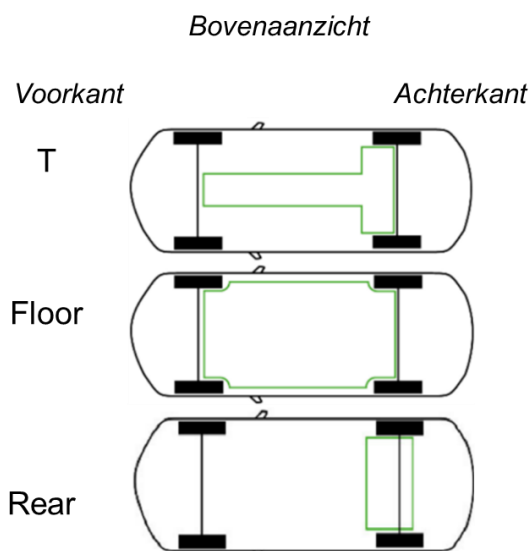
2.1 Elektrisch voertuig

In het batterijpakket is elektrische energie opgeslagen waarmee de elektromotor van een elektrisch voertuig wordt aangedreven. Het batterijpakket (300 - 1000 V) bestaat uit meerdere modules (< 60 V) en elke module bestaat uit afzonderlijke batterijcellen (~4 V). De algemene opbouw van een batterijpakket is weergegeven in Figuur 2.1. Een voertuig dat volledig elektrisch wordt aangedreven door het batterijpakket, wordt ook wel een BEV (Battery Electric Vehicle) genoemd.



Figuur 2.1 Schematische weergave batterijpakket elektrisch voertuig

Er zijn drie hoofdconfiguraties waarop het batterijpakket in het voertuig kan liggen. In Figuur 2.2 zijn deze configuraties weergegeven, met van boven naar beneden de 'Floor'-, 'T'- en 'rear'-configuratie. In de meeste gevallen bevindt het batterijpakket zich onder in het voertuig, waarbij de meest gebruikte configuraties de 'T'- en 'Floor'-configuratie zijn. Bij de 'rear'-configuratie bevindt het batterijpakket zich aan de achterkant van het voertuig, zoals zichtbaar is in de figuur onderaan. Deze configuratie wordt voornamelijk toegepast in kleinere auto's en hybride voertuigen met een kleiner batterijpakket, omdat de constructie daarvan eenvoudiger is en er zo sprake is van een efficiënter ruimtegebruik en een betere gewichtsverdeling.



Figuur 2.2 Hoofdconfiguraties batterijpakket

2.2 Thermal runaway

Een thermal runaway is een ongewenste exotherme reactie in het inwendige van batterijcellen, waarbij hitte, brandbare en toxische gassen vrijkomen. Kenmerkend voor dit intrinsieke veiligheidsprobleem is dat een thermal runaway zichzelf in stand houdt, onder meer doordat de hitteproductie zichzelf versterkt.

Een **thermal runaway** is in principe een proces dat op celniveau plaatsvindt. Het uitbreiden van een thermal runaway van een batterijcel naar omliggende batterijcellen noemen we **thermische propagatie**. De term thermal runaway wordt echter vaak ook op module- of pakketniveau gehanteerd. Men kan bijvoorbeeld ook zeggen dat een batterijpakket in thermal runaway is, als een of meerdere batterijcellen binnenin het betreffende pakket in thermal runaway zijn geraakt.

Een thermal runaway in een batterijcel is een zichzelf in stand houdende reactie; het is daarom in principe niet mogelijk om de thermal runaway van een individuele batterijcel te stoppen. Daarom schrijven we in dit rapport dat het doel van de uhd-inzet het **stoppen van de thermische propagatie** is. Zodra de thermal runaway van de laatste actieve batterijcel in het pakket ten einde komt (omdat het chemische proces is afgelopen), en er door succesvolle koeling geen thermische propagatie meer plaatsvindt, kan worden gezegd dat de thermal runaway in het batterijpakket is gestopt.

De State of Charge (SoC), oftewel de mate waarin een batterij is opgeladen, beïnvloedt het brandverloop bij een thermal runaway (NIPV, 2023). Hoe hoger de SoC, hoe meer energie en warmte vrijkomen tijdens een thermal runaway en hoe groter de kans is op (zelf)ontsteking van de vrijgekomen brandbare gassen, met vlammen tot gevolg. De vlamvorming is in het algemeen het sterkst bij een SoC van 90 % tot 100 %, wat ook de reden is dat batterijen met vergelijkbare laadniveaus vaak worden gebruikt in brandexperimenten zoals in deze studie (K. Wilkens, persoonlijke communicatie, 5 en 6 juni 2023). Bij een lagere SoC van minder dan 30 % komen weliswaar brandbare gassen vrij, maar is de hoeveelheid energie die vrijkomt beperkt, waardoor (zelf)ontbranding van deze gassen onwaarschijnlijk is (NIPV, 2023).

2.2.1 Toxische gassen

De gassen die bij een thermal runaway vrijkomen, zijn toxisch (zie het scenarioboek NIPV voor gegevens over de samenstelling).

2.2.2 Vlammen en fakkels

De gassen die vrijkomen bij een thermal runaway zijn brandbaar. Er kunnen zich twee scenario's voordoen: 1) een directe ontsteking van de brandbare gassen, of 2) geen directe ontsteking, waarbij een wolk brandbare gassen vrijkomt die mogelijk vertraagd tot ontsteking komen. In geval van brand zullen de gassen onder hoge druk uit het batterijpakket worden geperst via de overdrukventielen of door openingen in het batterijpakket die het gevolg zijn van schade, overdruk dan wel brand. Deze brandbare gassen kunnen resulteren in vlammen en fakkels. Daarnaast kunnen er ook fakkels in onverwachte richtingen ontstaan als de behuizing beschadigd raakt.

2.2.3 Explosie

De brandbare gassen kunnen bij ophoping tot een explosie leiden. In het bijzonder kan dit gebeuren wanneer het voertuig inpandig of onder een carport staat geparkeerd of wanneer de gassen zich ophopen in een (afgesloten) voertuigcabine (Vos et al., 2024). De brandbare gaswolk kan onder bepaalde condities ontsteken, een zogeheten vertraagde ontsteking.



Figuur 2.3 Explosieve ontbranding dampwolk (foto: onbekend)

Explosies bij branden in elektrische voertuigen waarbij de batterij is betrokken, zijn een realistisch scenario. Een recent voorbeeld is een explosie van een hybride Jeep in Gent in november 2023. Gassen veroorzaakt door een thermal runaway hadden zich opgehoopt in het voertuig. Na inslaan van de ramen door de brandweer kwamen deze gassen in het explosiebereik, waarna een dampwolkontbranding ontstond. Het moment van explosie is te zien in Figuur 2.3. Uit data van EV Firesafe blijkt dat een dergelijke explosie, voor zover bekend, 22 keer wereldwijd heeft plaatsgevonden tussen 2010 tot en met juni 2024 (EV Firesafe, 2024).

2.3 Het bestrijdingsprobleem van elektrische voertuigbranden

De incidentbestrijding van een batterijpakket in thermal runaway is niet alleen complex, omdat het proces zichzelf in stand houdt. Ook zijn batterijcellen omgegeven door een stevige behuizing, waardoor koelwater amper bij de cellen in de buurt kan komen, wat koeling van buitenaf zeer moeizaam maakt (Brans, 2023).

Naast de gevaarlijke effecten van een thermal runaway, besproken in de voorgaande paragraaf, is er ook sprake van een hoogspanningssysteem in een elektrisch voertuig. De brandweer kan in een ongunstig scenario onderdeel worden van een gesloten stroomkring tijdens de toepassing van het uhd-blussysteem. Dit is echter een zeldzaam scenario en de kans hierop wordt uitermate klein geacht (Brandweeracademie, 2020; Hessels & Geertsema, 2023). Bovendien bieden persoonlijke beschermingsmiddelen hiertegen enige bescherming. Het is echter niet mogelijk om tegelijkertijd brandwerende handschoenen en elektrisch isolerende handschoenen te dragen; elektrisch isolerende handschoenen gericht op werken met elektriciteit kunnen daarom tijdens brandbestrijding niet worden gebruikt.

2.4 Huidige inzetacties

Er zijn er op dit moment in Nederland twee manieren om een thermal runaway in een elektrisch voertuig te stoppen, namelijk het inzetten van een dompelcontainer of het uit laten branden van het batterijpakket (Hessels & Geertsema, 2023).

Bij de eerste methode met een dompelcontainer wordt het voertuig in een vloeistofdichte container geplaatst, die wordt gevuld met water, totdat het batterijpakket volledig onder water staat. De omgeving kan op deze manier niet meer worden blootgesteld aan de vlammen, terwijl de thermal runaway gecontroleerd uitwerkt. Dit wordt ondersteund doordat water via eventuele beschadigingen en kieren langzaam het batterijpakket binnenloopt en de batterijcellen enigszins koelt. Het koelvermogen van het gebruikte water wordt in deze situatie echter vrijwel niet benut, waardoor de procedure wat dat betreft vrij inefficiënt is. De batterijcellen zijn namelijk goed omgeven door het voertuigchassis en de behuizing, waardoor het water niet of nauwelijks de batterijcellen kan bereiken. Daarnaast moeten er schade aan en openingen in het batterijpakket zijn, wil het water goed het pakket kunnen indringen en zo de cellen kunnen bereiken. Bovendien is het proces langdurig: het voertuig moet enkele dagen in de dompelcontainer blijven staan. Ook is inzet van deze methode kostbaar, omdat het (vervulde) water uit de dompelcontainer moet worden afgevoerd; het gaat daarbij om enkele duizenden liters water.

Een tweede methode is het uit laten branden van het voertuig: alle energie uit het batterijpakket brandt dan op. Voordelen daarvan zijn dat er geen vervuild bluswater achterblijft en brandweerpersoneel in principe niet kan worden blootgesteld aan de (onverwachte) effecten van een thermal runaway. Bovendien zal de batterij in principe volledig of grotendeels uitbranden, waardoor de kans op herontsteking klein is. Deze methode kan echter alleen worden toegepast als er voldoende vrije ruimte is en de omgeving niet wordt gehinderd door schadelijke effecten. In een bebouwde omgeving zoals een stadscentrum, is het vanzelfsprekend niet wenselijk om een auto uit te laten branden.

2.5 Ultrahogedruk snij- en blussysteem

Het NIPV heeft eerder onderzoek gedaan naar mogelijke alternatieven voor de dompelmethode, waaronder een uhd-blussysteem (Hessels & Geertsema, 2023). Dit type systemen wordt in Nederland bij gebouwbranden ingezet voor onder andere een offensieve buitenzet (NIFV, 2012). In Nederland worden de Coldcut Cobra en het vergelijkbare CoolFire systeem (verschillende merken van uhd-blussystemen) ingezet in verschillende brandweerkorpsen (UHD-Blussing.nl, 2024).

Met een uhd-blussysteem kunnen brandhaarden van buitenaf worden benaderd. Met een dergelijk systeem kan namelijk aan de buitenzijde van een muur of wandscheiding een gat worden gemaakt, waardoor vervolgens water geïnjecteerd kan worden. uhd-blussystemen worden al meer dan twintig jaar toegepast. Ze zijn spin-offs vanuit de offshore industrie bij de brandbestrijding van scheepsbranden. Uitgangspunt bij de ontwikkeling ervan was het vergroten van de veiligheid van brandweermensen.

De werking en oorspronkelijke inzetwijze van een uhd-blussysteem is als volgt. Water wordt met een pomp tot ultrahogedruk gebracht; in het geval van de Cobra is dat 300 bar. Daarna wordt het abrasief toegevoegd, een korrel-poederachtige substantie die als slijpmiddel fungeert. Additieven kunnen naar keuze worden toegevoegd aan het bluswater. Het debiet van het water is 60 liter per minuut en de uittreedsnelheid van het water kan oplopen tot 200 m/s, waardoor het vernevelt. Op die manier kan een groot oppervlak worden bereikt, waardoor de besloten ruimte sneller kan worden gekoeld (J. Hellsten en A. Trewe, persoonlijke communicatie, 17 en 18 juli 2023). Door de faseovergang van water naar stoom kan veel energie (warmte) aan de brandhaard worden onttrokken. Dit is te danken aan het fysische principe van de hoge latente warmte behorend bij de faseovergang van water naar stoom.

Bij testen met een uhd-blussysteem op een afgesloten ruimte wordt over het algemeen het volgende beeld waargenomen (J. Hellsten en A. Trewe, persoonlijke communicatie, 17 en 18 juli 2023): de rook die vanuit de brandruimte naar buiten komt, is aanvankelijk dik en zwart. Na het aanbrengen van watermist door het gemaakte gat wordt de rook of damp overwegend wit en lijkt meer op stoom van het verdampte water. Tijdens testen in zeecontainers is tijdens dit proces een drastische temperatuurafname gemeten, hetgeen aangeeft dat de koeling snel en effectief is.

Bij de inzet tijdens de brandexperimenten die voor het voorliggende onderzoek zijn uitgevoerd, is het blussysteem feitelijk op een andere manier ingezet dan waarvoor het oorspronkelijk is ontworpen. In plaats van water te vernevelen over een besloten ruimte, wordt het hier gebruikt om water te injecteren in een batterijpakket. Onder meer om deze reden is het belangrijk om te testen of het systeem effectief is voor deze nieuwe toepassing.

3 Bestaande kennis en ervaring

3.1 MSB en Coldcut Systems

The Swedish Civil Contingencies Agency (MSB) heeft in samenwerking met Coldcut Systems uit Zweden in een recent onderzoek geconcludeerd dat een uhd-blussysteem effectief is voor het stoppen van de propagatie van een thermal runaway in het batterijpakket bij een elektrische voertuigbrand (MSB, 2023). De leerpunten uit dit onderzoek en de adviezen van Coldcut Systems worden in deze paragraaf besproken.

3.1.1 Fakkels

MSB heeft tijdens zijn brandproeven met zowel een volledig batterijpakket (67 kWh), een kleiner pakket (26 kWh), als een module (6,54 kWh) brandontwikkeling geobserveerd en vervolgens de branden geblust. Tijdens de observaties is bekeken vanuit welke plekken de meeste fakkels vrijkomen. Op basis van het experiment en van andere ervaringen van Coldcut Systems blijkt dat vlammen en fakkels kunnen vrijkomen vanuit de overdrukventielen en eventuele schadeplekken aan de behuizing van het batterijpakket. De behuizing van het batterijpakket is in veel gevallen namelijk voorzien van drukontlastingsopeningen (ook overdrukventielen genoemd) om bij een thermal runaway gassen af te voeren en zo een te hoge drukopbouw te voorkomen. Er moet wel benadrukt worden dat overdrukventielen en (zichtbare) schadeplekken slechts een indicatie geven en geen zekerheid voor wat betreft de locatie van het vrijkomen van fakkels (Coldcut Systems, 2024).

De onverwachte vlammen (hieronder verstaan we ook fakkels) kunnen het voor de brandweer moeilijk maken om veilig te werken. Door MSB werd de kans op het ontstaan van fakkels tijdens het experiment als groter ingeschat dan de risico's van explosie of elektrocutie (P. Malmquist, persoonlijke communicatie, 2 november 2023). Fakkels kunnen verhinderen dat brandweerlieden de juiste positie bereiken om het uhd-blussysteem effectief in te kunnen zetten. Ook bestaat het risico dat ze onverwacht aan deze fakkels worden blootgesteld. Daarom is het cruciaal om tijdens de inzet voortdurend te monitoren waar de vlammen zich bevinden en de locatie van het uhd-blussysteem hierop aan te passen. Dit betekent dat brandweerlieden zich aan de kant met de minste vlammen moeten opstellen (Coldcut Systems, 2024). Daarnaast moet er iemand met een lagedrukstraal worden ingezet om degenen die het uhd-blussysteem bedienen te beschermen tegen de fakkels (Coldcut Systems, 2024).

3.1.2 Explosie

Het risico van brandweeroptreden in relatie tot de explosie kan worden beperkt. Indien de auto nog gesloten is, moet eerst een veilige situatie worden gecreëerd. Daarvoor dienen de gassen uit het voertuig te worden geleid (MSB, 2024). Een ventilator kan hiervoor worden ingezet (Coldcut Systems, 2024).

3.1.3 Toxische Gassen

Het onderzoek van MSB laat zien dat de bluskleiding van brandweerpersoneel, inclusief ademlucht, voldoende bescherming biedt tegen blootstelling aan toxische gassen (MSB, 2024). Het is echter wel noodzakelijk om de bluskleiding te reinigen na contact met de gassen van een thermal runaway (RIVM, 2021).

3.1.4 Elektrocutie

De brandweer kan mogelijk onderdeel worden van een gesloten stroomkring tijdens de toepassing van het uhd-blussysteem. De kans hierop wordt door MSB uitermate klein geacht.

3.1.5 Penetratieplek en inzetlocatie

Coldcut Systems (2024) en MSB (2024) adviseren op basis van hun experiment en andere praktijkervaringen dat de beste penetratieplek om het uhd-blussysteem in te zetten zo dicht mogelijk bij de grootste hotspot is. Met een warmtebeeldcamera (WBC) kan worden gezocht naar deze hotspot. Voorwaarde is wel dat er een veilige inzetpositie is voor degene die het uhd-blussysteem bedient, dat wil zeggen dat hij of zij niet wordt blootgesteld aan vlammen. Wanneer de inzet is geslaagd, wordt vervolgens met de WBC naar een eventuele volgende hotspot gezocht, waarop dan het uhd-blussysteem wordt ingezet. Deze procedure moet worden herhaald totdat alle hotspots zijn verdwenen.

Het kan mogelijk zijn dat de beste penetratieplek niet gebruikt kan worden en een andere penetratieplek gezocht moet worden. Uit het experiment van MSB is gebleken dat water vanaf een andere (secundaire) locatie naar de primaire locatie kan stromen (MSB, 2024), mits het batterijpakket niet-gecompartimenteerd is. Indien een batterijpakket wel is gecompartmenteerd (dat wil zeggen: bestaat uit meerdere afzonderlijke modules met een scheiding daartussen), is het niet mogelijk om water vrij te laten stromen. Water dat in het compartiment van de secundaire locatie wordt ingebracht, kan niet het compartiment van de primaire locatie bereiken. Dat betekent dat wanneer water in een ander compartiment wordt ingebracht, het water het compartiment in thermal runaway niet zal bereiken. In dat geval moet het uhd-blussysteem altijd op een nieuwe plek worden ingezet binnen het betreffende primaire brandcompartiment (Coldcut Systems, 2024).

Wanneer het voertuig schuin staat, bijvoorbeeld op een heuvel, kan het nuttig zijn vanaf het hoogste punt in te zetten (Coldcut Systems, 2024). In dat geval stroomt water vanaf het hoogste punt naar het laagste punt in de batterij, waardoor deze zoveel mogelijk gevuld wordt met water. Als er lager wordt ingezet, bestaat het risico dat het bovendeele niet voldoende wordt gekoeld.

Met betrekking tot de aanvalshoek, oftewel de hoek waaronder de lans van het uhd-blussysteem op het batterijpakket wordt gericht, heeft Coldcut Systems de volgende bevindingen gedaan:

- > Bij een aanvalshoek van 90 graden (recht van boven) is het relatief eenvoudig om door de behuizing van het batterijpakket te penetreren. Dit is in de praktijk de makkelijkste aanvalshoek.
- > Bij een aanvalshoek van ongeveer 45 graden (+/- 15 graden) duurt het iets langer om door de behuizing te dringen. Een hoek van circa 45 graden zorgt voor een langere afstand van de penetratielocatie tot de onderkant van het batterijpakket. Dit heeft wel als

voordeel dat een groter deel van het batterijpakket wordt bereikt door de directe waterstraal.

- > Het is mogelijk om de zijkant van het batterijpakket te penetreren wanneer dit de enige optie is. Hoewel de directe waterstraal in dat geval mogelijk minder modules bereikt, zorgt het ingebrachte water alsnog snel voor een koelend effect.

3.1.6 Inbrengen water

Nadat het gat in het batterijpakket is gemaakt, moet het water dermate lang worden ingebracht dat propagatie kan worden gestopt. Ervaringen van Coldcut Systems (2024) en MSB (2024) geven aan dat dit enkele minuten kan duren (als indicatie wordt gezegd tussen de vijf en tien minuten).

Een goede graadmeter voor wanneer de inbreng van het water daadwerkelijk leidt tot koeling van de batterijcellen, is wanneer het water in het batterijpakket door de warmte van de thermal runaway wordt omgezet in stoom (Coldcut Systems, 2024). Deze stoom is visueel te herkennen. Wanneer er geen stoomvorming meer is en water aan de bovenzijde uit het batterijpakket loopt, is dat een indicatie dat een groot gedeelte van de hitte is weggenomen en de propagatie is gestopt. Het inbrengen van het water kan dan worden gestopt. Met een WBC kan vervolgens worden gezocht naar eventuele hotspots die over zijn gebleven, waarop dan het uhd-blussysteem kan worden ingezet. MSB adviseert een temperatuur van 50 graden Celsius of meer aan te houden als indicator voor een hotspot (MSB, 2024). Wanneer het water na één minuut nog niet wordt omgezet in stoom, kan er sprake zijn van de eerder genoemde compartimentering of een verkeerde lokalisatie van de hotspot. In dat geval moet er op een andere locatie worden ingezet.

Verder kan het bij het inzetten van het uhd-blussysteem gebeuren dat onbeschadigde cellen worden geraakt door het water met het abrasief. Deze cellen kunnen in thermal runaway raken door de schade die het abrasief aanbrengt, iets wat onvermijdelijk is. Doordat direct water wordt ingebracht, wordt propagatie van deze thermal runaway echter vrijwel direct voorkomen (MSB, 2024).

3.1.7 Veilige situatie

Inzet van het uhd-blussysteem heeft als doel terug te keren naar een veilige en stabiele situatie, dat wil zeggen, een voertuig waarvan het batterijpakket niet meer in thermal runaway is. MSB en Coldcut Systems geven aan dat een temperatuur 50 graden Celsius of minder over het gehele batterijpakket (en daarmee dus het ontbreken van hotspots) een goede indicator is dat (propagatie van) de thermal runaway is gestopt. Coldcut Systems (2024) adviseert vervolgens het voertuig 15 minuten continu met een warmtebeeldcamera te monitoren. MSB (2024) daarentegen geeft aan nog niet duidelijk te hebben hoe lang deze periode moet duren.

In verband met een mogelijke herontsteking wordt geadviseerd om na inzet het voertuig op een veilige plaats te zetten, zodat eventuele herontsteking niet leidt tot branduitbreiding of risico's voor personen (MSB, 2024). Het is namelijk mogelijk dat in niet-uitgebrande delen van het batterijpakket, zogeheten 'stranded energy' achterblijft (MSB, 2024). Deze 'stranded energy', ofwel achtergebleven energie, kan op een later moment voor herontsteking zorgen.

3.2 Tsjechië

In Tsjechië is men vijf jaar geleden ook begonnen met het testen van de inzet van een uhd-blussysteem voor het stabiliseren van de batterij bij elektrische voertuigbranden (J. Hellsten en A. Trewe, persoonlijke communicatie, 17 en 18 juli 2023). Er zijn daar in de afgelopen jaren meerdere testen uitgevoerd in samenwerking met een autofabrikant. Ook is in Tsjechië al een uhd-blussysteem ingezet bij een daadwerkelijk incident met een elektrische voertuigbrand in een ondergrondse parkeergarage in Praag (EV Firesafe, 2023). Op dit moment wordt er in Tsjechië gewerkt aan een standaard handelingsperspectief voor de inzet van een uhd-blussysteem bij elektrische voertuigbranden.

3.3 Kennishiaten met betrekking tot de Nederlandse context

De opgedane kennis en ervaringen uit het buitenland bieden een goede basis om de mogelijkheid voor de inzet van een uhd-blussysteem in Nederland verder te onderzoeken. Daarbij hebben wij de volgende kennishiaten geconstateerd die wij beogen op te vullen met het brandexperiment in Schiphol:

- > De gepubliceerde onderzoeksresultaten bieden onvoldoende basis voor de ontwikkeling van een operationeel handelingsperspectief voor Nederlandse uhd-eenheden. Mede doordat inzet van uhd-eenheden veelal een specialisme is in Nederland, kan een mogelijk andere systematiek dan door bijvoorbeeld Coldcut Systems wordt geadviseerd wenselijk zijn. Om dat te bepalen, wordt nagegaan of de geadviseerde inzetprocedure van Coldcut Systems en MSB ook effectief en praktisch uitvoerbaar blijkt wanneer een Nederlandse uhd-eenheid deze uitvoert.
- > Het ontbreken van beeldmateriaal om een overtuigend en duidelijk beeld te krijgen van de uhd-inzet.

Daarnaast zijn de volgende twee kennishiaten geconstateerd in het vooronderzoek door Veiligheidsregio Haaglanden (zie paragraaf 1.1):

- > Er is geen handelingsperspectief voor optreden bij gasophoping in een afgesloten passagierscabine.
- > Een onderbouwing met bijvoorbeeld stroomgeleidingstesten van de stelling dat de kans op elektrocutierisico klein wordt geacht.

4 Voorbereiding en opzet brandexperiment Schiphol

4.1 Methode initiëren thermal runaway

Voorafgaand aan de experimenten is een voorstudie uitgevoerd naar de verschillende methodes om een thermal runaway in een elektrisch voertuig te starten. Deze voorstudie is opgenomen in Bijlage 1; de resultaten ervan zijn beknopt weergegeven in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Resultaten voorstudie initiëren thermal runaway

| | Verwarmingsplaat <i>thermisch</i> | Gasbrander <i>thermisch</i> | Spijker- of schroefpenetratie <i>mechanisch</i> |
|--------------------|---|--|--|
| Voordelen | <ul style="list-style-type: none"> > Mogelijkheid tot aanbrengen van thermokoppels en voltmeters voor monitoring. > Mogelijkheid tot toepassen van twee platen. > Typisch scenario thermal runaway > Voorspelbaar (locatie en tijdstip) > Controleerbaar (temperatuur en veilige afstand) | <ul style="list-style-type: none"> > Eenvoudig > Financieel voordelig > Directe ontbranding van brandbare gassen, waardoor explosierisico wordt verkleind. > Veilige afstand (beperkt) | <ul style="list-style-type: none"> > Meerdere pogingen mogelijk > Direct tot snel resultaat > Locatie thermal runaway enigszins voorspelbaar |
| Nadelen | <ul style="list-style-type: none"> > Er is specifieke vakkennis nodig; dit kost tijd en geld > Risico op explosie | <ul style="list-style-type: none"> > Zeldzaam scenario > Worst-case scenario > Thermal runaway als gevolg van een voertuigbrand <i>in plaats van</i> voertuigbrand als gevolg van een thermal runaway. > Beperkte mobiliteit van de gasbrander | <ul style="list-style-type: none"> > Er wordt schade toegebracht aan het batterijpakket. > Gassen en fakkels kunnen uit de gaten komen. > Het batterijpakket is lastig bereikbaar. > Penetratieopstelling maken kost tijd. |
| Eindoordeel | De methode is veilig en effectief. | De methode is niet veilig en niet effectief. | De methode is veilig en effectief. |

Op basis van deze voorstudie is geconcludeerd dat een verwarmingsplaat in het batterijpakket een geschikte en veilige methode is om een thermal runaway tot stand te

brengen, omdat deze onder meer gecontroleerd kan worden gestart, een realistisch scenario nabootst en weinig nadelen heeft. Met de leverancier van de voertuigen is deze optie besproken, maar het bleek niet mogelijk te zijn om verwarmingsplaten in de fabriek in te bouwen. Zodoende is gekozen voor de mechanische methode. Deze is namelijk ook veilig en effectief gebleken. Bij de mechanische methode wordt een batterijpakket in thermal runaway gebracht door middel van een mechanische beschadiging op batterijniveau.

Wij wilden de veiligheid van degene die de mechanische beschadiging zou toebrengen waarborgen door een constructie te maken waarmee deze op afstand kon blijven. Hiertoe is door Veiligheidsregio Haaglanden een systeem ontwikkeld, dat bestaat uit een boorstandaard waaraan een kolomboormachine is bevestigd. Aan deze kolomboormachine is een touw vastgemaakt. Door het afwikkelen van dit touw draait de kolomboormachine naar beneden. Hiermee is men in staat om buiten het voertuig aan het touw te trekken, waarmee de boormachine in het batterijpakket kan worden gedraaid. Het systeem zoals geïnstalleerd in de voertuigen is weergegeven in Figuur 4.1. Wanneer deze werkwijze succesvol is en een elektrische voertuigbrand ontstaat, gaat de boormachine in principe verloren.

De opstelling bestaat uit de volgende onderdelen:

- > boorstandaard
- > spanklem
- > boormachine
- > lange boor
- > touw
- > klein materiaal voor het bouwen en bevestigen van de opstelling.

Op basis van schematische tekeningen van het batterijpakket, verstrekt door de leverancier van de voertuigen, is de locatie van doorboren gekozen. Van tevoren is de vloer van de wagens op de boorlocatie weggehaald, zodat direct op de bovenkant van de batterij kon worden geboord om de succeskans op het initiëren van een thermal runaway te vergroten.



Figuur 4.1 Opstelling boormachine

4.2 Stroomgeleidingstesten

Try-outs Veiligheidsregio Haaglanden

Twee aspecten die niet konden worden bekeken tijdens het brandexperiment in Schiphol, zijn ter voorbereiding in de vorm van twee deelexperimenten getest door Veiligheidsregio Haaglanden. Dit betroffen als eerste stroomgeleidingstesten om het mogelijk bestaande elektrocutierisico uit te sluiten. Ten tweede is de mogelijkheid getest om met een uhd-blussysteem op afstand de ramen kapot te spuiten, zodat brandbare gassen kunnen worden afgevoerd wanneer de passagierscabine afgesloten is. Een kort verslag met de resultaten van deze voorbereidende deelexperimenten is gegeven in deze paragraaf en paragraaf 4.3.

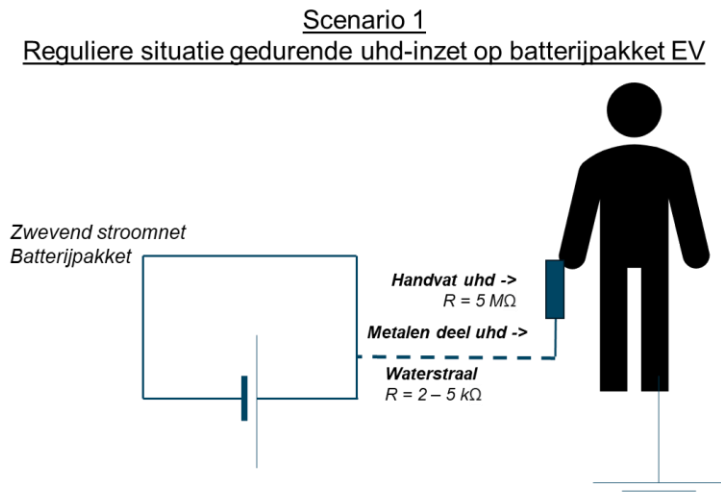
Bij het aanraken van zowel de plus- als minpool van een batterij bestaat het risico op elektrocutie. De kans hierop bij regulier brandweeroptreden bij een elektrisch voertuig is nagenoeg nihil (Brandweeracademie, 2020). Inzet van uhd-blussystemen op batterijen van een elektrisch voertuig is destijds echter niet meegenomen in de risicoafweging van de Brandweeracademie uit 2020. In alinea 3.1.4 is besproken dat het elektrocutiegevaar als klein wordt beschouwd door experts uit het buitenland die eerder met uhd-blussystemen in een batterijpakket hebben gesneden. Om dit te verifiëren en nader inzicht te krijgen in het elektrocutierisico zijn stroomgeleidingstesten uitgevoerd.

Deze testen zijn uitgevoerd met een 1000 V spanningsbron, oscilloscoop, autowrak en Coolfire-blussysteem (een type uhd-blussysteem). Met de oscilloscoop zijn weerstanden gemeten van diverse stroomkringen. De resultaten staan in Tabel 4.2. Hierin zijn in de linker kolom de componenten van de stroomkring weergegeven en in de middelste kolom de gemeten weerstand daarvan. De conclusie die uit de meting kan worden getrokken staat in de rechterkolom. Om de betekenis hiervan te duiden en te visualiseren, zijn drie scenario's uitgewerkt. Die worden hieronder besproken.

Tabel 4.2 Resultaten Stroomgeleidingstest

| Stroomkring | Gemeten Weerstand (R) | Conclusie op basis van de gemeten weerstand |
|---|-----------------------|--|
| Stalen delen Coolfire in verbinding met het voertuigchassis onder spanning. | 5 – 7 Ohm | De stalen delen van de Coolfire kunnen onder spanning komen te staan. |
| Handvat van de Coolfire in verbinding met het voertuigchassis onder spanning | 5.000.000 Ohm | Handvatten zijn goed geïsoleerd. |
| Spuitmond via de waterstraal naar een spanningsbron. <i>Scenario tijdens een uhd-inzet, waarbij de spanningsbron als batterijpakket fungeert.</i> | 20.000 – 50.000 Ohm | Theoretisch gezien kan een potentiële stroom gaan lopen. Elektrocutierisico voor de uhd-bediener is echter zeer onwaarschijnlijk vanwege het zwevend net van het elektrische voertuig. |

4.2.1 Scenario 1: Reguliere situatie tijdens uhd-inzet op het batterijpakket van een elektrisch voertuig



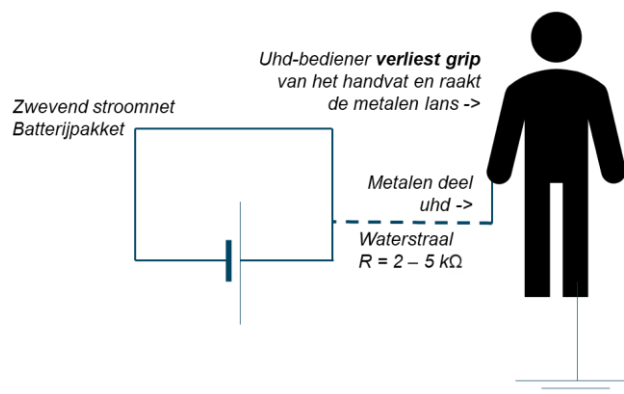
- Er is sprake van een **dubbele beveiliging** tegen elektrocutiegevaar.
1. Het handvat is goed elektrisch geïsoleerd.
 2. Er is **geen** gesloten stroomkring mogelijk vanwege het zwevend stroomnet

Figuur 4.2 Reguliere situatie tijdens uhd-inzet ($R = \text{weerstand}$)

Onder de reguliere omstandigheden tijdens een uhd-inzet is er in essentie sprake van een dubbele beveiliging tegen elektrocutiegevaar (zie Figuur 4.2). Ten eerste is uit de testen van Veiligheidsregio Haaglanden gebleken dat de handvatten namelijk goed elektrisch geïsoleerd zijn, waardoor ze geen elektrische stroom zullen geleiden. Ten tweede is er sprake van een zwevend stroomnet dat de vorming van een gesloten stroomkring verhindert (Victron Energy, 2023). De situatie waarin de eerste beveiliging 'faalt', wat wil zeggen dat de uhd-bedieners (bijvoorbeeld zijn grip verliest en) metalen delen aanraakt van het uhd-blussysteem, is in scenario 2 gevisualiseerd.

4.2.2 Scenario 2: De uhd-bedieners raakt per ongeluk de metalen delen van het uhd-blussysteem aan

Scenario 2
Per ongeluk aanraken van metalen delen van het uhd-blussysteem



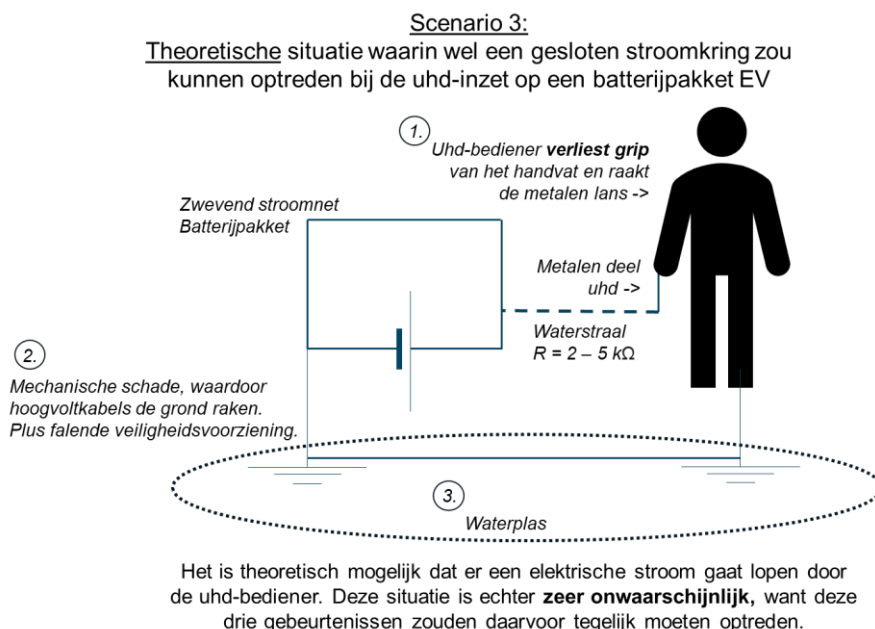
Er is **geen** gesloten stroomkring vanwege het zwevend stroomnet en zodoende **geen** elektrocutiegevaar.

Figuur 4.3 Per ongeluk aanraken van de metalen delen van het uhd-blussysteem

Uit de testen bleek dat de stalen delen van het uhd-blussysteem onder spanning kunnen komen te staan als zij in direct contact komen met een spanningsbron. Dit is ook mogelijk bij contact via de waterstraal. De waterstraal zal in dat geval wel een weerstand vormen (uit de test bleek 20.000 tot 50.000 Ohm), waardoor een potentiële elektrische stroom behoorlijk in stroomsterkte zal worden verlaagd. Deze weerstand is echter niet hoog genoeg om een potentieel gevaarlijke stroomsterkte daadwerkelijk onmogelijk te maken.

Hoewel de metalen delen van het uhd-blussysteem dus ook via een waterstraal onder spanning kunnen komen te staan, is er in dat geval nog steeds geen direct elektrocutiegevaar (Figuur 4.3). Dit wordt verklaard door het feit dat het batterijpakket een zwevend stroomnet is dat niet in verbinding staat met de aarde of onderdelen buiten het elektrisch voertuig (Victron Energy, 2023). Vanwege dit fenomeen is er geen gesloten stroomkring mogelijk.

4.2.3 Scenario 3: Theoretische situatie waarin wel een gesloten stroomkring zou kunnen optreden



Figuur 4.4 Theoretische faalsituatie

In de Figuur 4.4 is de situatie uitgewerkt waarin het theoretisch wel mogelijk is dat er een elektrische stroom door de uhd-bediener gaat lopen. Opgemerkt dient te worden dat deze door de weerstand van de waterstraal alsnog beperkt zal zijn. De uhd-bediener zou hiervoor de metalen delen van het uhd-blussysteem per ongeluk moeten aanraken, terwijl hij ook via, bijvoorbeeld, een waterplas op de grond in contact staat met een ander punt van het batterijpakket. In dit voorbeeld is dat een hoogvoltkabel onder spanning die via wederzijds contact met een waterplas een stroomkring vormt met de uhd-bediener. Hierbij dient opgemerkt te worden dat mogelijke veiligheidsvoorzieningen om de hoogvoltkabel spanningsloos te maken daarbij gefaald dienen te hebben.

4.2.4 Conclusie stroomgeleidingstesten

Samenvattend concluderen wij dat onder gewone omstandigheden (scenario 1), alsook bij het per ongeluk aanraken van metalen delen (scenario 2), elektrocutiegevaar amper van toepassing is. Er is een theoretische faalsituatie te bedenken waarin wel sprake is van een gesloten stroomkring (scenario 3); dat zich deze voordoet is echter zeer onwaarschijnlijk.

4.3 Kapot spuiten van de ramen

In paragraaf 3.3 is besproken dat er geen handelingsadviezen bekend zijn die betrekking hebben op het scenario van een afgesloten passagierscabine waar mogelijk sprake is van een explosiegevaar door brandbare gassen die zich hebben kunnen ophopen. Veiligheidsregio Haaglanden heeft hiervoor een suggestie, namelijk om vanaf ruime afstand met hogedruk de ramen van het voertuig kapot te spuiten. Het uhd-blussysteem kan dit met water met abrasief. De ramen zullen hierdoor barsten, waardoor de brandbare gassen het voertuig kunnen verlaten. Tevens zal door de hoge impuls van het gespoten water het ventileren van de gassen drastisch worden versneld. Het is hierbij van belang om op ruime afstand te staan; zie Figuur 4.5.

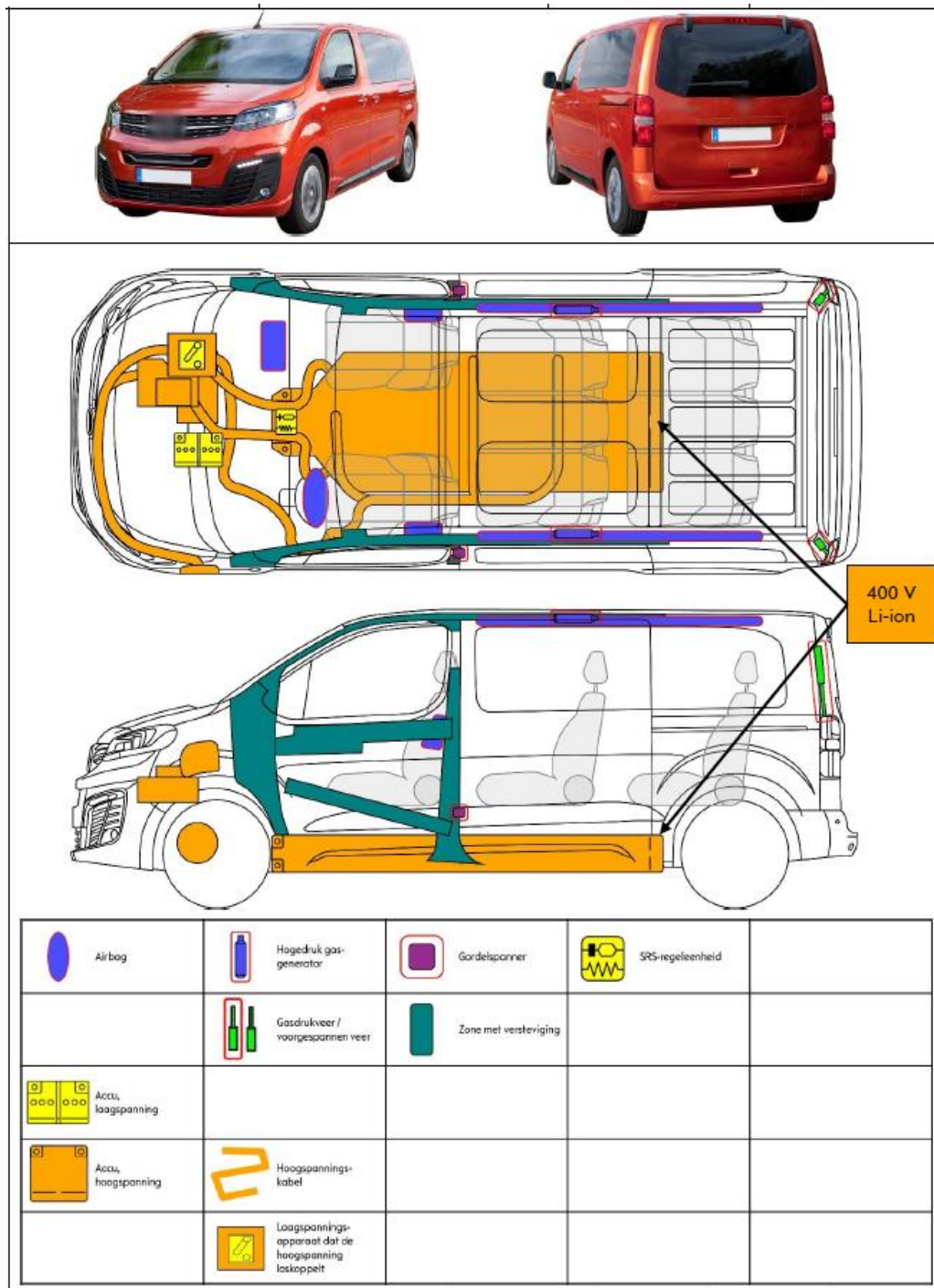


Figuur 4.5 Inzet uhd-blussysteem om ramen kapot te spuiten (foto: Veiligheidsregio Haaglanden)

Bij een deelexperiment met een sloopauto heeft de veiligheidsregio geconstateerd dat het vanaf een afstand van zeven meter het mogelijk is om de ramen kapot te spuiten. Daarnaast is vastgesteld dat het mogelijk is om vanaf één kant de ruiten aan beide zijden van de auto eruit te spuiten. Hiervoor wordt vanaf dezelfde positie door het voertuig heen gespoten. Tijdens deze handeling dient uiteraard niemand zich in de spuitrichting van het uhd-blussysteem te bevinden. Het verwijderen van de gassen uit het voertuig kan worden versneld door inzet van een ventilator.

4.4 Testvoertuigen Brandexperiment Schiphol

Voor beide experimenten is gebruikgemaakt van twee nagenoeg identieke elektrische voertuigen. Beide voertuigen betroffen volledig elektrische multi purpose vehicles (MPV) met een 75kWh Li-ion batterijpakket, subtype NMC (nikkel-mangaan-kobaltoxide). Het batterijpakket bestond uit een behuizing met daarin losse modules. Er bevonden zich geen scheidingen of compartimenteringen in het batterijpakket. Een afbeelding en schematische tekening van het voertuigtype zijn weergegeven in 4.6. Dit is ook de 'rescue informatie sheet' van de testvoertuigen, waarop in het oranje een tekening van het batterijpakket met hoogspanningskabels is afgebeeld. Het eerste testvoertuig was uitgerust met een lege laadruimte. Het tweede testvoertuig was uitgerust met twee met leer beklede stoelen en een stoffen vloer in de laadruimte.



Figuur 4.6 Rescue informatie sheet van het testvoertuig¹

4.4.1 Preparaties aan het voertuig tijdens het experiment

De voertuigen zijn voorafgaand aan het experiment volledig opgeladen (100 % SoC) en vanaf de oplaadlocatie naar de experimentlocatie gereden (circa één kilometer). Op deze wijze kon een zo hoog mogelijke SoC worden gegarandeerd. Om de veiligheid van het in te zetten brandweerpersoneel tijdens het incident te vergroten zijn aanvullend de volgende handelingen aan het voertuig uitgevoerd:

¹ Op de tekening is een voertuigconfiguratie met twee rijen met stoelen achter in het voertuig weergegeven. Ons eerste testvoertuig had geen stoelen achterin en ons tweede testvoertuig had daar één rij stoelen.

- > De banden zijn leeggelaten om een onverwachte explosie daarvan te voorkomen.
- > Gasveren zijn verwijderd om onverwachte explosies daarvan te voorkomen.
- > De ramen van de chauffeurs- en passagiersdeur, evenals de schuifdeuren aan de zijkanten van het voertuig, zijn open gezet. Hiermee kon een eventuele ophoping van brandbare gassen worden voorkomen, zodat de kans op een explosie zoveel mogelijk werd verlaagd.

4.5 Deelnemende brandweerploegen

4.5.1 Basisbrandweereenheid

De in te zetten basisbrandweereenheid, een tankautospuiter (TS) met een zespersoons bezetting, had als opdracht om de gebruikelijke procedure rondom voertuigbrandbestrijding te volgen. Hiervoor had de bemanning van de TS van te voren de ELO Brandweer nogmaals bestudeerd. De TS was ter beschikking gesteld door Veiligheidsregio Amsterdam-Amstelland en werd bemand door brandweerpersoneel van de veiligheidsregio's Amsterdam-Amstelland, Haaglanden en Utrecht.

Intermezzo: inzetprocedure voertuigbrandbestrijding

Conform de e-module voertuigbranden bestaat de procedure rondom voertuigbrandbestrijding (op hoofdlijnen) uit de volgende stappen:

- > Benader het voertuig onder een hoek van 45 graden.
- > Draagt ademlucht en zorg dat je niet in de rook loopt.
- > Maak gebruik van twee stralen lage druk om de voertuigbrand te blussen.

4.5.2 Eenheden uhd-blussysteem

De aan het experiment deelnemende uhd-eenheden waren afkomstig uit de kazernes van:

- > Nieuwegein-Zuid / Vreeswijk (Veiligheidsregio Utrecht); deze ploeg is in de ochtend ingezet. De ploeg beschikte over een Coldcut Cobra uhd-blussysteem.
- > Rijswijk (Veiligheidsregio Haaglanden); deze ploeg is in de middag ingezet. De ploeg beschikte over een Coolfire uhd-blussysteem.

Beide brandweerploegen hebben praktijkervaring met en zijn getraind in het optreden met een uhd-blussysteem. De deelnemende ploegen zijn van te voren aanvullend bijgeschoold door Cold Cut Academy, de opleidingstak van Coldcut Systems. Tijdens deze sessie zijn ze getraind in het inzetten van het uhd-blussysteem op het brandende batterijpakket van een elektrisch voertuig. Dit betekent dat de brandweerploegen grotendeels volgens de adviezen van Coldcut Systems hebben gewerkt.

Er is gekozen om te werken met twee verschillende uhd-eenheden, en niet twee keer met dezelfde ploeg, om de volgende redenen:

- > Er zijn twee verschillende hogedruk snij- en blussystemen bij brandweerkorpsen in Nederland.
- > Er zijn twee testvoertuigen beschikbaar. Het inzetten van twee afzonderlijke ploegen bevordert de gelijkwaardigheid van beide testen, omdat een lerend effect wordt voorkomen.

4.6 Locatie

De experimenten hebben plaatsgevonden op de Brandweer Oefenplaats (Broef) van Brandweer Amsterdam Airport Schiphol op een terrein op ruim voldoende afstand van bebouwing. Het voertuig werd daarbij geplaatst op een aflopend stuk asfalt met daarachter een waterkering, zodat het (mogelijk) vervuilde bluswater kon worden opgevangen. Dit bluswater is direct door een verwerker afgezogen. Het voertuig is geplaatst op metalen rijplaten om beschadiging van het asfalt te voorkomen.

4.6.1 Indeling

De globale indeling van de locatie is weergegeven in Figuur 4.7.



Figuur 4.7 Indeling terrein

De blauwe vlakken geven de locatie weer van de uhd-eenheid en de TS. Het gele vlak was het werkgebied van de onderzoekers. In het oranje gebied was het alleen toegestaan met ademlucht op te opereren. Het rode gebied was gedurende de experimenten vanwege de toxische gassen en rook verboden toegang. De gebogen groene lijn geeft de locatie van de bluswaterkering weer, en de oranje pijl de overheersende windrichting van die dag.

4.6.2 Meteorologische omstandigheden

Volgens het meetpunt van het KNMI op Schiphol was er sprake van de volgende meteorologische omstandigheden tijdens de experimenten. Met name de windrichting is relevant, omdat die de plaatsing van de bovengenoemde veiligheidszones heeft beïnvloed.

10:00

26,5 graden Celsius; relatieve luchtvochtigheid van 51 %; 6 m/s uurgemiddelde wind met maximale windstoten van 10 m/s; windrichting 230 graden, dus vrijwel zuidwest.

14:00

27,1 graden Celsius; relatieve luchtvochtigheid 49 %, 6 m/s uurgemiddelde wind met maximale windstoten van 10 m/s; windrichting 260 graden, dus vrijwel west.

Er was sprake van warme omstandigheden voor brandweeroptreden. Ingezette brandweerlieden hebben elkaar daarom voldoende afgewisseld om niet oververhit te raken.

4.7 Veiligheid en ethiek

In dit onderzoek is aan een brandweerploeg gevraagd om een bestaand type gereedschap op een nieuwe situatie toe te passen. Hoewel de ploegleden professioneel zijn opgeleid om met gevaarlijke situaties om te gaan, wordt hen in dit experiment gevraagd om handelingen uit te voeren in een nieuwe situatie dicht bij de risicobron (het brandende voertuig). Kenmerkend voor elektrische voertuigbranden is een zekere mate van onvoorspelbaarheid in het brandverloop. Hierdoor kunnen potentieel gevaarlijke situaties ontstaan, waardoor het passend is dat wij de keuze voor een brandexperiment met onderzoeksdeelnemers (het brandweerpersoneel) kunnen verantwoorden. Hiertoe hebben wij een ethische verantwoording geschreven. In de experimentele wetenschap wordt immers een ethische verklaring aanbevolen wanneer onderzoek wordt uitgevoerd met mensen dat niet valt onder de Wet medisch-wetenschappelijk onderzoek met mensen (WMO) (Radboud Universiteit, 2023).

De Radboud Universiteit (2023) heeft zeven ethische principes opgesteld, waaraan een dergelijk experimenteel onderzoeksvoorstel dient te voldoen. Deze hebben wij als basis gebruikt voor onze ethische afweging. Deze zeven principes zijn hieronder weergegeven en de bijbehorende onderbouwing ervan is opgenomen in Bijlage 2: Ethisch afwegingskader.

1. Wetenschappelijke relevantie: Het onderzoek is wetenschappelijk relevant.
2. Proportionaliteit: De verwachte baten staan in verhouding tot de verwachte inspanningen.
3. Methodologische degelijkheid: De onderzoeker gebruikt de juiste onderzoeksmethoden voor het betreffende onderzoeksprobleem.
4. Risico's en veiligheid: De deelnemers aan het onderzoek moeten zo veilig mogelijk zijn en aan zo min mogelijk risico's worden blootgesteld.
5. Uitvoering: Het onderzoek en de experimenten moeten worden uitgevoerd door gekwalificeerd personeel.
6. Gegevensbeheer: Er moet rekening worden gehouden met de relevante procedures voor gegevensbeheer. Deze hebben onder andere betrekking op gegevensopslag, gegevensverzameling en toegang tot de onderzoeksgegevens.
7. Autonomie: De autonomie van onderzoeksdeelnemers moet worden gerespecteerd.

Naast deze ethische verantwoording zijn er door deelnemende partijen RI&E's (Risico-inventarisatie en Evaluatie) gemaakt:

- > Coldcut Systems heeft een RI&E gemaakt over de inzet van een Cobra Coldcutter op een brandend batterijpakket van een elektrisch voertuig.
- > Veiligheidsregio Haaglanden heeft een RI&E gemaakt over de inzet van een Coolfire op een brandend batterijpakket van een elektrisch voertuig.
- > Brandweer Amsterdam Airport Schiphol heeft een RI&E gemaakt over het houden van de proef op de betreffende locatie.

Daarnaast is er een vergunning verleend door de Omgevingsdienst Noordzeekanaalgebied om de proef te houden op de locatie. Ook is er meermaals contact geweest met MSB over de door deze instantie gehouden tests van de inzet van een uhd-blussysteem op een brandend batterijpakket. De door MSB verkregen informatie is in de testopzet verwerkt.

Ten slotte is als veiligheidsvoorziening een dompelcontainer op de experimentlocatie aanwezig geweest. Als het experiment zou falen, was er de mogelijkheid het elektrische voertuig in een dompelcontainer te plaatsen. Ook was er gedurende het experiment een veiligheidsfunctionaris aanwezig.

4.8 Tijdschema van de experimenten

Voor beide experimenten is vooraf een richtinggevend tijdschema opgesteld voor het verloop van de experimenten. Dit is weergegeven in Tabel 4.3. In dit schema heeft de basisbrandweereenheid de taak om de voertuigcarrosserie te blussen en de uhd-eenheid om met het uhd-blussysteem vervolgens het batterijpakket te stabiliseren. De veiligheidsfunctionaris heeft gedurende beide experimenten gekeken of er veilig werd gehandeld.

Het tijdstip $t_1 = \text{start timer}$ of $t_1 = 0$ betekent dat de timer gaat lopen. Dit tijdstip is vastgesteld op het moment dat de onderzoeker, wiens functie het visueel waarnemen van het experiment en beheren van de timer is, vlammen waarneemt uit het batterijpakket en/of voertuig. Na dit tijdstip is gekozen om een opkomsttijd van 10 minuten aan te houden voor de basisbrandweereenheid ofwel TS, omdat dit in Nederland een realistische opkomsttijd is voordat een brandweervoertuig na melding ter plaatse is.

Nadat de bevelvoerder op tijdstip $t_2 = \text{oproep uhd-eenheid}$ de uhd-eenheid heeft opgeroepen, volgt een opkomsttijd van 5 minuten voor deze eenheid. Dit is een kortere opkomsttijd dan bij een daadwerkelijk incident kan worden verwacht. Hiervoor is gekozen om de voortgang van het experiment te bevorderen en te voorkomen dat de batterij te ver zou doorbranden. Daardoor was de kans groter dat de batterij nog voldoende vuurlast zou hebben en werd voorkomen dat het uhd-blussysteem op een uitgebrande batterij zou worden ingezet.

Het sein brand meester is gegeven wanneer de uhd-inzet effectief was gebleken. Hiervoor werd aangehouden dat rook, vlammen en stoom afkomstig uit het batterijpakket zouden zijn gestopt en dat er weglekkend water werd waargenomen uit het batterijpakket. Dit is visueel en met behulp van een WBC vastgesteld door de bevelvoerder en/of uhd-bediener van de uhd-ploeg.

Het einde van het experiment werd aangekondigd zodra er 45 minuten lang geen rook dan wel vlammen of waarneembare opwarming van het batterijpakket werd waargenomen met de WBC. Bij eventuele opwarming in deze 45 minuten zou er opnieuw een uhd-blussysteem worden ingezet. Hierna zouden de 45 minuten opnieuw beginnen. Mocht opwarming meermaals (blijven) plaatsvinden, dan kon worden gekozen het voertuig onder te dompelen.

Tabel 4.3 Tijdsverloop van de experimenten

| Tijdstip | Gebeurtenis |
|---|---|
| Start experiment <i>bepaald door testleider</i> | Start thermal runaway door boormachine te starten |
| Ontwikkeling thermal runaway | |
| t₁ = start timer <i>bepaald en gestart door onderzoeker</i> | Vlammen uit het batterijpakket worden waargenomen. |
| t ₁ + 9 minuten | Alarmering basisbrandweereenheid |
| t ₁ + 10 minuten | Basisbrandweereenheid ter plaatse; inzet op de voertuigbrand |
| Inzet Tankautospuiter | |
| tijdsinterval tussen t ₁ + 10 min. en t ₂ | |
| t₂ = oproep uhd-eenheid <i>bepaald door bevelvoerder TS</i> | Bevelvoerder TS roept uhd-eenheid ter plaatse |
| t ₂ + 4 minuten | uhd-eenheid gealarmeerd |
| t ₂ + 5 minuten | uhd-eenheid ter plaatse |
| Inzet uhd-eenheid | |
| tijdsinterval tussen t ₂ + 5min. en t ₃ | |
| t₃ = sein brand meester <i>bepaald door bevelvoerder tankautospuiter</i> | Brand meester: batterijpakket is stabiel |
| t ₃ + 45 minuten | Einde experiment, mits in deze 45 minuten geen opwarming van het batterijpakket heeft plaatsgevonden. |

Na afloop van de experimenten heeft er onder leiding van onderzoekers van het NIPV een debriefing plaatsgevonden. Daarin hebben de deelnemende eenheden als groep mondeling hun ervaring(en) gedeeld over het betreffende experiment.

4.9 Omschrijvingen voor (visuele) waarnemingen tijdens het experiment

De waarnemingen om de toestand van het batterijpakket en de effectiviteit van het uhd-blussysteem te beoordelen, zullen in dit experiment grotendeels visueel zijn en worden ondersteund met een WBC. Wij hebben vier omschrijvingen opgesteld om de staat van het batterijpakket in relatie tot de uhd-inzet te bepalen; deze zijn weergegeven in Tabel 4.4. Omdat wij beogen de praktische toepasbaarheid te beoordelen en daarom zoveel mogelijk een praktijksituatie willen nabootsen met ons experiment, zijn voor het vaststellen van de staat van het batterijpakket geen middelen gebruikt die niet standaard aanwezig zijn op een

TS. Een uitzondering hierop vormt de inspectie van het batterijpakket na afloop van de brandweerinzet.

Tabel 4.4 Omschrijvingen (visuele) waarnemingen batterijpakket

| Definitie | Toelichting |
|---|--|
| <p>Thermal Runaway is van kracht.</p> <p><i>Waarneming: visueel, gehoor en warmtebeeldcamera.</i></p> | <p>Er blijven rook en/of vlammen uit het batterijpakket komen, nadat de carrosserie van het elektrisch voertuig is geblust. Dit wordt visueel vastgesteld door de bevelvoerder van de TS.</p> <p>Ondersteunend hierbij kunnen met het gehoor sissende en poppende geluiden van openbarstende batterijcellen worden waargenomen, of kunnen met een WBC hotspots op het batterijpakket worden waargenomen.</p> |
| <p>Het batterijpakket wordt gekoeld.</p> <p><i>Waarneming: visueel</i></p> | <p>Er is stoomvorming vanuit het batterijpakket. Dit wordt visueel vastgesteld door de bevelvoerder van de uhd-ploeg.</p> |
| <p>De uhd-inzet is effectief.</p> <p><i>Waarneming: visueel en warmtebeeldcamera</i></p> | <p>Rook en vlammen als gevolg van thermal runaway, alsook stoom uit het batterijpakket zijn alle gestopt plus weglekkend water wordt waargenomen uit het batterijpakket. Dit wordt visueel en met behulp van een WBC vastgesteld door de bevelvoerder en/of uhd-bediener. Tevens zijn er geen hotspots meer waarneembaar met de WBC.</p> |
| <p>De uhd-inzet is succesvol en kan worden beëindigd.</p> <p><i>Waarneming: visueel en warmtebeeldcamera</i></p> | <p>Er zijn tenminste 45 minuten onafgebroken geen zichtbare rook en vlammen waargenomen. Daarnaast worden er binnen en na deze 45 minuten geen hotspots meer waargenomen op het batterijpakket. Dit wordt visueel en met behulp van een WBC vastgesteld door de bevelvoerder van de uhd-ploeg.</p> |

5 Meetgegevens brandexperimenten Schiphol

In dit hoofdstuk worden de waarnemingen beschreven die gedaan zijn tijdens de twee brandexperimenten, in paragraaf 5.1 die van het experiment in de ochtend en in 5.2 die van dat in de middag.

5.1 Brandexperiment 1 – ochtend

In deze paragraaf worden de waarnemingen van het brandexperiment in de ochtend beschreven en zijn de ervaringen van de deelnemende brandweerploegen weergegeven. Een tijdlijn met bijbehorend beeldmateriaal en toelichtingen van het eerste brandexperiment is opgenomen in Bijlage 3: Tijdsverloop ochtend. Hierin zijn de visuele waarnemingen van de onderzoekers genoteerd.

5.1.1 Initiatie thermal runaway

Tijdens het eerste experiment zijn direct na het doorboren van het batterijpakket kortstondig (enkele seconden) vlammen waargenomen. Hierop is, volgens het tijdschema uit paragraaf 4.8, de timer gestart. In die periode was er echter geen rook- of vlamontwikkeling meer zichtbaar. Na negen minuten is daarom door de onderzoekers besloten om nog geen basisbrandweereenheid ter plaatse te sturen. Het gewenste scenario van een volledige elektrische voertuigbrand was namelijk niet bereikt. Er is gekozen om op dat moment opnieuw een gat te boren om een thermal runaway te initiëren. Tijdens deze poging is een thermal runaway zich echter alsnog 'uit zichzelf' gaan ontwikkelen. Toen 14 minuten na de initiële start timer ($t_1 = 0$) duidelijk vlammen zichtbaar waren uit het batterijpakket, is gekozen de timer nogmaals te starten, waarmee het zogeheten tijdstip 'start timer' opnieuw werd vastgesteld.

5.1.2 Inzet uhd-eenheid

Het uhd-blussysteem is initieel ingezet op de locaties waar de grootste hotspot zat, nadat deze met een warmtebeeldcamera waren gelokaliseerd (Figuur 5.1). Vervolgens is het systeem meermaals ingezet op de locaties waar andere hotspots zich bevonden. Hierbij werd de verwachte stoomvorming ook waargenomen, waarmee werd bevestigd dat de koeling actief was (5.2). Het uhd-blussysteem is telkens enkele minuten ingezet op de verschillende hotspots om de thermische propagatie in te dammen. Water kon relatief makkelijk door het batterijpakket stromen.

Tijdens dit experiment zijn er tijdens de uhd-inzet geen vlammen uit het batterijpakket waargenomen. Daarom is door de bevelvoerder, in lijn met de eerder gegeven training,

gekozen om één lagedrukstraal in te zetten als back-up om onverwachte vlammen uit het batterijpakket direct te kunnen doven.



Figuur 5.1 Lokalisatie en monitoren hotspot en gereedmaken voor penetratie



Figuur 5.2 Stoomvorming tijdens inzet uhd-blussysteem

5.1.3 Einde uhd-inzet

Van te voren was bepaald dat er gedurende 45 minuten geen zichtbare rook en/of vlammen van het batterijpakket mochten worden waargenomen voordat het experiment zou worden beëindigd. Tijdens het eerste experiment bleef er echter, ondanks de herhaaldelijke inzet van het uhd-blussysteem, voortdurend rook uit de batterij komen. Er werd met de WBC slechts een lichte verhoging in temperatuur waargenomen (de exacte temperatuur is niet

geregistreerd door de WBC), rondom de opening van het batterijpakket van waaruit deze rook kwam. Deze hotspot nam gedurende vijftien minuten niet in omvang toe, zoals te zien was op de WBC. Met een 4-gasmeter werd wel CO gemeten, maar geen waarde op de explosiegevaarmeter (LEL-meetcel). Dit duidde erop dat er geen sprake was van waterstofgas (een brandbaar gas dat vrijkomt bij een thermal runaway.) Het bovenstaande in ogenschouw nemend hebben enkele projectleden, een hoogvoltspecialist en de instructeurs van Coldcut Systems overleg gevoerd. Uit dit overleg volgde dat de meest waarschijnlijke verklaring voor de rook op dat moment was dat er sprake was van brandende bedrading of isolatie op een plaats die het water niet kon bereiken.

Vervolgens bleven er twee opties over: dompelen of het verwijderen en apart leggen van de batterij. De optie dompelen is als eerste besproken. Mede vanwege de afweging dat er geen sprake was van een thermal runaway is niet voor deze optie gekozen. Er kon dan bovendien geen onderzoek meer aan het pakket worden verricht en daarnaast streeft dompelen een ander doel na: het stoppen van de propagatie van de thermal runaway. Er is toen door de projectleider besloten om het voertuig weg te halen van de experimentlocatie, de batterij door een hoogvoltspecialist te verwijderen en deze op een veilige locatie apart te leggen.

5.1.4 Inspectie batterijpakket na afloop

Zoals boven beschreven, is het batterijpakket apart gelegd doordat er rookontwikkeling bleef plaatsvinden die niet nader kon worden verklaard. Het batterijpakket is vervolgens circa vier uur visueel gemonitord. Na deze circa vier uur was de rook verdwenen. De oorzaak van deze rook hebben wij niet met volledige zekerheid kunnen vaststellen, maar mogelijk is de rook het resultaat van een exotherme reactie tussen uit de batterijcellen vrijgekomen elektrolyt en bluswater. In de periode tussen het onderzoek en afvoer naar de recycling (donderdag 27 juni tot en met dinsdag 2 juli), heeft er geen herontsteking van het batterijpakket plaatsgevonden.

In paragraaf 3.1.5 was besproken dat het mogelijk is dat het uhd-blussysteem batterijcellen beschadigt, waardoor deze in thermal runaway kunnen raken. Een voorbeeld van een dergelijke beschadiging in de batterij van het experiment is te zien in Figuur 5.3, waar in het omcirkelde vlak de schuine intrede van het blusmiddel met abrasief te zien is. Onbekend is of deze schade ervoor heeft gezorgd dat deze cellen in thermal runaway zijn gegaan. In Figuur 5.4 is in rood omcirkeld waar de snijgaten zitten van het uhd-blussysteem.



Figuur 5.3 Schade of snijgaten na inzet uhd-blussysteem



Figuur 5.4 Snijgaten inzet uhd-blussysteem

Verder is gedurende het experiment de bovenkant van het batterijpakket losgekomen van de onderkant. Oorzaak hiervan is dat de lijm tussen de boven- en onderkant op sommige plaatsen heeft losgelaten door de warmte. Ten gevolge van de overdruk die is ontstaan door gassen van de thermal runaway, is de bovenkant op sommige plekken losgedrukt van de onderkant. Hierdoor zijn diverse openingen van zo'n vier centimeter ontstaan halverwege de hoogte van het batterijpakket (zie Figuur 5.5).



Figuur 5.5 Opening batterijpakket door overdruk

Aan de voorzijde van het voertuig bevond zich een tweetal modules waarop maar beperkt brandschade is geconstateerd. Op deze modules werd een spanning gemeten van 100V.

5.1.5 Scores en debriefing brandweerploeg

De deelnemende brandweerploegen van het eerste experiment hebben individueel op een schaal van 1 tot 10 scores toegekend aan hun gevoel over de inzet en de ervaren moeilijkheidsgraad van de inzet. Hierbij was voor wat betreft het gevoel een score van 10 uiterst positief en een score van 1 uiterst negatief. Bij de ervaren moeilijkheidsgraad was 10 uiterst makkelijk en 1 uiterst moeilijk. De scores van de TS-eenheid zijn weergegeven in Tabel 5.1 en die van de Cobra-eenheid in Tabel 5.2. Hierbij was de tankautospuit van de Veiligheidsregio Amsterdam-Amstelland en bemand met brandweerpersoneel van de Veiligheidsregio Amsterdam-Amstelland, Haaglanden en Utrecht. De Cobra-eenheid was bemand met brandweerpersoneel van de Veiligheidsregio Utrecht.

Tabel 5.1 Scores TS van het experiment in de ochtend

| Taak gedurende inzet | Eenheid | score gevoel (1 negatief – 10 positief) | score moeilijkheidsgraad (1 moeilijk – 10 makkelijk) |
|-------------------------|-----------|---|--|
| Bevelvoerder | TS (VRU) | 8 | 9 |
| Nummer 1 | TS (VRH) | 8 | 10 |
| Nummer 2 | TS (VRH) | 8 | 8 |
| Nummer 3 of 4 | TS (VRH) | 9 | 9 |
| Nummer 3 of 4 | TS (VRAA) | 9 | 9 |
| Gemiddelde score | TS | 8,4 | 9 |

Bij het geven van de scores hebben de individuele deelnemers van de eerste TS het volgende aangegeven:

- > Nummer 2: “Cobra team ontnam zicht van de straalploeg.”
- > Nummer 1: “De auto was leeg, dit maakte het makkelijker.”
- > Nummer 3 of 4: “Positief verrast bij cobra, accupakket blussen is lastig voor autospuit. Cobra geeft meer tijd.”

Tabel 5.2 Scores Cobra-eenheid (uhd) van het experiment in de ochtend

| Taak gedurende inzet | Eenheid | score gevoel (1 negatief – 10 positief) | score moeilijkheidsgraad (1 moeilijk – 10 makkelijk) |
|-----------------------------|-------------|---|--|
| uhd-bedieners | Cobra (VRU) | 8 | 10 |
| Bevelvoerder | Cobra (VRU) | 8 | 8 |
| Warmtebeeldcamera-bedienaar | Cobra (VRU) | 9 | 9 |
| Waarnemer | Cobra (VRU) | 10 | 10 |
| Ventilator-bedienaar | Cobra (VRU) | 8 | 9 |
| Gemiddelde score | Cobra (VRU) | 8,6 | 9,2 |

Bij het geven van de scores zijn door de individuele deelnemers van de Cobra-eenheid de volgende opmerkingen gemaakt.

- > Waarnemer: “Hij [de batterijbrand] is uit.”

Verder werd door de Cobra-ploeg opgemerkt dat bij het eerste experiment de ventilator niet optimaal stond gepositioneerd, waardoor de rook niet goed werd weggeblazen.

Na afloop van het experiment is een gezamenlijke debriefing gehouden met de eenheden van de TS en de Cobra. Het verslag hiervan is weergegeven in onderstaand kader. De debriefing is uitgevoerd door een trainer-adviseur van het NIPV met ruime brandweer-ervaring. De informatie uit de debriefing wordt in het volgende hoofdstuk geanalyseerd.

Verslag gezamenlijke debriefing brandweerploegen eerste experiment – ochtend

Wat was het verwachte resultaat?

De aanpak was besproken; het plan was om te zoeken naar een hotspot en daarop in te zetten. Het gevoel heerste ‘we gaan dat ding uitmaken’. De instructies vooraf aan het Cobra-team hadden vertrouwen gewekt.

Wat is er daadwerkelijk gebeurd?

Het plan om te zoeken naar een hotspot en daarop in te zetten is ook daadwerkelijk uitgevoerd. De hotspot zat in het midden van het batterijpakket.

Er werd gesproken tussen beide bevelvoerders over zaken omtrent het inzetten van de Cobra. Door de WBC wisten we hoe de Cobra ingezet moest worden. Gerichtte instructies waren erg belangrijk.

Wat ging goed?

- > Goede voorbereiding.
- > Duidelijke opdrachten van de bevelvoerder.
- > Monitoring tijdens het incident. Gedurende de Cobra-inzet ben je gefocust op één ding, waardoor monitoring van hetgeen om je heen gebeurt fijn is.
- > Voor de Cobra-ploeg is het fijn dat de andere ploeg de brand onder controle heeft, zo is er iets meer tijd.
- > Stoomvorming wordt zichtbaar na een twee minuten, waardoor je doorkrijgt dat het werkt.

Wat kon beter?

- > Volgens het Cobra-team had de afstand tussen de Cobra-bediener en de man erachter groter gekund, waardoor meer bewegingsvrijheid was verkregen voor het bedienen van de Cobra.
- > Ter voorkoming van het branden van plastics naderhand, had de ruimte tussen de vloer en accu gevuld kunnen worden met water. Als dit geen oefening was geweest, was dat ook gedaan.
- > Het groter maken van het 'cobragaatje', waardoor meer spelingsruimte ontstaat.
- > Het bevestigen dat er geen risico's meer zijn door de bevelvoerder.

Had er eerder achterhaald kunnen worden dat de plastics branden en niet het accupakket?

- > Bij inzet van de Cobra ontstaat rook/damp door het terugbrengen van de temperatuur. Dit was niet het geval bij de plastics.

Is alles benoemd?

Cobra-team: Volg je instinct.

5.2 Brandexperiment 2 – middag

In deze paragraaf worden de belangrijkste waarnemingen van het brandexperiment in de middag beschreven en zijn de ervaringen van de deel deelnemende brandweerploegen weergegeven. Een tijdlijn met bijbehorend beeldmateriaal en toelichtingen van het brandexperiment is opgenomen in Bijlage 4: Tijdsverloop middag. Hierin zijn de visuele waarnemingen van de onderzoekers genoteerd.

5.2.1 Initiatie thermal runaway

Bij het tweede experiment waren direct na het inbrengen van de boormachine fakkels waarneembaar uit het batterijpakket. In dit geval stond binnen tien minuten het volledige voertuig in brand.

5.2.2 Inzet uhd-eenheid

Tijdens de tweede inzet werd volgens dezelfde procedure gewerkt, waarbij hotspots met behulp van de WBC werden gelokaliseerd en vervolgens gepenetreerd met het uhd-blussysteem (Figuur 5.6). Daarbij werden herhaaldelijk vlammen waargenomen uit het batterijpakket (Figuur 5.7). Om die reden is er continu een straal ingezet om deze vlammen te doven en een tweede straal als back-up voor de eerste straal of om vanuit een andere hoek de vlammen te kunnen bestrijden. Het doven van deze vlammen is weergegeven in 5.8. De meest ideale locatie voor de uhd-inzet, zo dicht mogelijk bij de hotspot, was vanwege de vlammen uit het batterijpakket moeilijk bereikbaar. Daarom is een lagedrukstraal ingezet om een veilige werkplek te creëren voor het personeel van de uhd-eenheid. Er

is meerdere keren ingezet met het uhd-blussysteem op verschillende hotspots, totdat er geen hotspots meer werden waargenomen.



Figuur 5.6 Lokalisatie hotspot met warmtebeeldcamera



Figuur 5.7 Fakkelt uit batterijpakket (onder de voorste passagiersdeur)



Figuur 5.8 Inzet van de lagedrukstraal om fakkels te doven tijdens de uhd-inzet

5.2.3 Einde uhd-inzet

Tijdens dit experiment is de wachttijd van 45 minuten na het sein brand meester ook gehanteerd en is in die tijd geen herontsteking waargenomen. Conform het opgestelde tijdschema kon het voertuig uit dit tweede experiment veilig gestald worden op afstand van andere objecten.

5.2.4 Inspectie batterijpakket na afloop

Ook bij dit experiment is het batterijpakket na afloop onder het voertuig vandaan gehaald om het te kunnen onderzoeken en makkelijk af te kunnen voeren naar een recyclingbedrijf. Het is vervolgens apart gelegd in een droge doppelcontainer om het nader te kunnen bekijken. Deze batterij is weergegeven in Figuur 5.9.



Figuur 5.9 Batterij van de tweede brandproef

Ook bij het batterijpakket van dit experiment zijn de onderkant en bovenkant van de behuizing losgekomen en zijn er enkele schadeplekken ontstaan. Het bleek dat de schade aan het batterijpakket bij het tweede experiment groter was dan bij het eerste experiment. Dit kan worden verklaard door het feit dat er bij het tweede experiment meer fakkels en vlammen uit het batterijpakket kwamen. Ook bij deze batterij was er op verschillende plaatsen rondom de behuizing sprake van een opening tussen de 2 en 4 cm. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in Figuur 5.10.



Figuur 5.10 Opening aan de zijkant van het batterijpakket van ca. 4cm

Tussen donderdag 27 juni tot en met dinsdag 2 juli, van het moment van onderzoek tot de afvoer naar recycling, heeft er geen herontsteking van het batterijpakket plaatsgevonden.

5.2.5 Scores en debriefing brandweerploegen

Ook de deelnemende brandweerploegen van het tweede experiment hebben individueel op een schaal van 1 tot 10 scores toegekend aan hun gevoel over de inzet en de ervaren moeilijkheidsgraad van de inzet. Hierbij was voor wat betreft het gevoel een score van 10 uiterst positief en een score van 1 uiterst negatief. Bij de ervaren moeilijkheidsgraad was 10 uiterst makkelijk en 1 uiterst moeilijk. De scores van de TS zijn weergegeven in Tabel 5.3 en die van de Coolfire-eenheid in Tabel 5.4.

Tabel 5.3 Scores TS van het experiment in de middag

| Taak gedurende inzet | Eenheid | score gevoel (1 negatief – 10 positief) | score moeilijkheidsgraad (1 moeilijk – 10 makkelijk) |
|-------------------------|-----------|---|--|
| Bevelvoerder | TS (VRU) | 8 | 9 |
| Nummer 1 | TS (VRH) | 8 | 10 |
| Nummer 2 | TS (VRH) | 8 | 8 |
| Nummer 3 of 4 | TS (VRH) | 9 | 9 |
| Nummer 3 of 4 | TS (VRAA) | 9 | 9 |
| Gemiddelde score | TS | 8,4 | 9 |

Bij het ochtend- en middagexperiment trad dezelfde TS-eenheid op. Deze heeft dezelfde scores toegekend als in de ochtend en heeft mondeling aangegeven dat het gevoel onveranderd is gebleven, ondanks het feit dat de brand fysisch gezien intenser en daardoor strikt gezien complexer was.

Tabel 5.4 Scores Coolfire-eenheid van het experiment in de middag

| Taak gedurende inzet | Eenheid | score gevoel (1 negatief – 10 positief) | score moeilijkheidsgraad (1 moeilijk – 10 makkelijk) |
|-------------------------|-----------------------|---|--|
| Tweede man | Coolfire (VRH) | 9 | 8 |
| Bevelvoerder | Coolfire (VRH) | 8 | 7 |
| Chauffeur | Coolfire (VRH) | 9 | 8 |
| uhd-bedieners | Coolfire (VRH) | 10 | 8 |
| Gemiddelde score | Coolfire (VRH) | 9 | 7,8 |

Na afloop van het experiment is een gezamenlijke debriefing gehouden met de eenheden van de TS en de Coolfire. Het verslag hiervan is weergegeven in onderstaand kader. De debriefing is uitgevoerd door dezelfde trainer-adviseur van het NIPV als in de ochtend. De informatie uit de debriefing wordt in het volgende hoofdstuk geanalyseerd.

Verslag gezamenlijke debriefing brandweerploegen tweede experiment middag

Wat was het verwachte resultaat?

Afgesproken was om na vier minuten te kijken hoe het ging.

Wat is er daadwerkelijk gebeurd?

- > De brand was feller, van tevoren werd rekening gehouden met het feit dat dit kon.
- > Direct volle bak aangepakt, het plan werd uitgevoerd zoals besproken.
- > Achteraf gezien werd bij het bestrijden van een brand met een open auto met twee stralen lage druk een sneller resultaat verwacht.

- > Er is volgens plan na vier minuten bekeken hoe het ging. De Coolfire moest vaker ingezet worden dan vooraf gehoopt.
- > De brand is met twee stralen lage druk aangepakt vanuit twee posities, namelijk vanaf de voorkant links en rechts. Vanaf de voorkant werd naar achter toe geblust; er werd 'gemanoeuvreed' tijdens het blussen.
- > De brand bleef steeds terugkomen.
- > Het werd niet verwacht dat er magnesium zou branden. Er werd besloten om dit te laten branden, waardoor het verder geen invloed had op het blussen.
- > Vergeleken met het eerste experiment kwam de brand meer aan de onderkant eruit. Het vermogen was langduriger door meer cellen tegelijkertijd. Dit was ook te horen.
- > De brand werd sneller geactiveerd dan de eerste, ondanks hetzelfde pakket. Het interieur van de auto was beter isolerend; mogelijk heeft dit veroorzaakt dat er meer cellen tegelijkertijd brandden, en het brandvermogen dus groter was.
- > Vanwege herrie was het lastiger communiceren.

Schrokken jullie niet van inzet op hoog voltage?

Nee, mede door instructies van Coldcut Systems. Die zeiden dat er geen gevaarlijke spanning was door de individuele cellen.

Wat ging er goed?

- > Penetratie van de accu
- > Eigen veiligheid: veilig naderen en veilig opstellen
- > Procedures
- > Snel met twee stralen vol koelen → snelle slachtkracht
- > Het 'erin geschoten plankje'² maakte het werken comfortabel, vermoeidheid bleef uit.
- > Reageren op wat je ziet.
- > Het gebruik van de ventilator ging gedurende de tweede inzet beter, omdat hij dichterbij stond.

Wat kon beter?

- > Dit experiment ging mede goed, mede omdat het 'een oefening' was. Wanneer een soortgelijk incident op straat plaatsvindt dan moet:
 - Het handelen beter worden geëvalueerd.
 - Meer tijd worden genomen voor een goede verkenning om het plan goed uit te voeren.
 - De omgeving beter worden gemonitord.
 - De specialistische ploeg ondersteund worden → eerste eenheid assisteert de uhd-ploeg.
 - Nu ging de rook één kant op, maar dit kan in de praktijk anders zijn [moeilijker zijn wanneer de rook zich in meerdere richtingen verspreidt].
- > Beter het koelend vermogen verdelen → posities aanpassen.
- > Nadelig was dat de ventilator op een gegeven moment stopte, de concentraties van de rook namen toen direct toe. Voortaan meer, en de juiste ventilatoren op de juiste plaats inzetten. Voor extra ventilatie hadden de ramen eruit gespoten kunnen worden. Een centerpons aan een stok waarmee een ruit doorgetikt kan worden, zou hiervoor misschien gebruikt kunnen worden.
- > Langere lans. Voor de eigen veiligheid.
- > Achterhalen van waar de stoom komt.
- > Focussen op het resultaat.

Is het resultaat volgens plan geweest (zoals verwacht)?

Het resultaat is bereikt. Het plan veranderde, omdat gereageerd moest worden op:

- > Het brandende magnesium.
- > Het opnieuw oplaaian van het vuur.
- > Het hogere brandvermogen in vergelijking met het experiment van de ochtend.

² De Coolfire-ploeg had ervoor gekozen om een houten plankje te bevestigen als steun voor de spuitmond van het uhd-blussysteem.

6 Analyse van de resultaten en antwoord op de onderzoeksvragen

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het onderzoek en brandexperiment nader geanalyseerd om vervolgens de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden. Met alle antwoorden kan vervolgens de veiligheid, effectiviteit en praktische toepasbaarheid in Nederland worden beoordeeld.

6.1 Veiligheid

Bij inzet van een uhd-blussysteem moet een voertuig tot op zeer korte afstand worden benaderd. Indien nodig, moet zelfs in het voertuig worden opgetreden, terwijl de batterij mogelijk nog in thermal runaway is, met bijkomende gevaren als gevolg van brand of explosie. Hieronder worden de drie bekende effecten – brand, explosie en toxische gassen – behandeld. Daarbij wordt ingegaan op het blootstellingsrisico en welke maatregelen kunnen worden genomen om dit risico zoveel mogelijk te minimaliseren. Na behandeling van deze drie effecten wordt ingegaan op het elektrocutierisico.

6.1.1 Brand

Vlammen bemoeilijken de brandweerinzet. Ze kunnen ervoor zorgen dat brandweelieden niet op de gewenste plek kunnen komen, die nodig is om veilig het uhd-blussysteem in te zetten, en bovendien kunnen zij onverwachts aan deze vlammen worden blootgesteld.

Om het risico op blootstelling aan (onverwachte) fakkels of vlammen voor brandweerpersoneel te minimaliseren tijdens de inzet van het uhd-blussysteem, zijn er dus ten minste een en mogelijk twee lagedrukstralen ingezet. De eerste lagedrukstraal is ingezet als veiligheidsmaatregel voor de uhd-bedieners om hen *directe bescherming te bieden* tegen onverwachtse vlammen in hun richting, zodat zij zich veilig kunnen terugtrekken. De tweede lagedrukstraal zou in dat geval worden ingezet om de eventuele vlammen *te bestrijden* en zorgt daarmee tevens ook voor afscherming.

Beantwoording Onderzoeksvraag 1

Hoe kan worden voorkomen dat brandweerpersoneel wordt blootgesteld aan onverwachte vlammen en fakkels tijdens de uhd-inzet?

Het risico kan worden verkleind door juiste positionering (zoveel mogelijk uit de vlammen en de rook) van de uhd-eenheid en toepassing van een lagedrukstraal voor directe blussing van vlammen uit het batterijpakket. Daarnaast moet er altijd een ‘vrije’ lagedrukstraal beschikbaar zijn als veiligheidsmaatregel en back-up.

6.1.2 Explosie

Tijdens de praktijkexperimenten hebben zich geen explosies voorgedaan. Zoals aangegeven zijn ramen en deuren in het voertuig geopend om het explosierisico zo klein mogelijk te houden. Daarnaast heeft de inzet van een ventilator ook bijgedragen aan het reduceren van het explosierisico tijdens inzet van het uhd-blussysteem.

Brandweerpersoneel dient zich er bewust van te zijn dat direct na de overgang van een situatie met een gesloten passagierscabine naar een open passagierscabine, bijvoorbeeld direct na het kapot spuiten van de ramen, er lucht in de cabine kan stromen. Dan kan er een gasmengsel ontstaan in het explosiegebied, met mogelijk een explosie als gevolg. Het is daarom van belang voldoende tijd in acht te nemen, nadat brandbare gassen uit een gesloten ruimte zijn geventileerd. Tot dat moment dient men ruim voldoende afstand te houden van het voertuig en met zo weinig mogelijk mensen in de buurt te staan.

Beantwoording Onderzoeksvraag 2

Hoe kan een dampwolkexplosie worden voorkomen tijdens de uhd-inzet?

Een dampwolkexplosie kan worden voorkomen door er zeker van te zijn dat brandbare gassen uit het voertuig zijn geventileerd, voordat er wordt ingezet. Een ventilator kan hierbij helpen. De ventilator kan daarnaast tijdens inzet van het uhd-blussysteem zorgen voor een veilige werkomgeving door vrijkomende gassen direct weg te blazen. In het geval van een afgesloten passagierscabine dienen eerst op afstand de ramen kapot te worden gespoten, waarmee ventilatie wordt gecreëerd.

6.1.3 Toxische gassen

Uit de voorstudie was gebleken dat persoonlijke beschermingsmiddelen en ademlucht in principe voldoende bescherming bieden tegen de toxische gassen. Wel is het, net als bij andere branden, van belang om het contact met rook te minimaliseren. Daarbij helpt het om zoveel mogelijk bovenwinds te werken. Dit zal echter door de positionering van het voertuig, de locatie van het batterijpakket en de hotspots niet altijd mogelijk zijn. Ook kan er gebruik worden gemaakt van een verlengstuk op het uhd-blussysteem om meer afstand tot het voertuig te creëren.

Vanwege de vervuilende rook dient na de inzet de bluskleding te worden uitgetrokken conform de procedure schoon werken en ter reiniging te worden aangeboden. Tijdens beide experimenten is ingezet personeel daarom na afloop door middel van droge decontaminatie ontsmet en zijn de bluspakken conform de procedure schoon werken van de betreffende veiligheidsregio schoongemaakt.

Beantwoording Onderzoeksvraag 3

Hoe kan worden voorkomen dat brandweerpersoneel wordt blootgesteld aan toxische gassen tijdens de uhd-inzet?

Met het dragen van persoonlijke beschermingsmiddelen en ademlucht is brandweerpersoneel rondom een elektrische voertuigbrand voldoende beschermd tegen toxische gassen. Een ventilator kan het risico op vervuiling van bluskleding enigszins verminderen, net als een verlengstuk op het uhd-blussysteem.

6.1.4 Elektrocutierisico

In paragraaf 4.2 zijn stroomgeleidingstesten besproken en uitgebreid toegelicht door de visualisatie van drie scenario's. De conclusie daarvan vormt het antwoord op onderzoeksvraag 4. Tijdens het brandexperiment zijn geen tekenen geweest dat de uhd-bediener of ander brandweerpersoneel is blootgesteld aan een elektrische schok.

Beantwoording Onderzoeksvraag 4

Hoe kan worden voorkomen dat brandweerpersoneel wordt blootgesteld aan elektrocutierisico's tijdens de uhd-inzet?

Het risico op elektrocutie voor de uhd-gebruiker is niet van toepassing wanneer het uhd-blussysteem correct wordt bediend, en is zeer onwaarschijnlijk wanneer metalen onderdelen van het uhd-blussysteem per ongeluk worden aangeraakt.

6.2 Effectiviteit

Voor het beoordelen van de effectiviteit van de uhd-inzet is het van belang dat er een geschikte inzetprocedure wordt gevolgd. Een uhd-inzet is effectief als deze de batterijcellen koelt en de thermische propagatie stopt.

6.2.1 Penetratieplek, inzetlocatie en inbrengen water

Om propagatie van de thermal runaway te stoppen, moeten de cellen zodanig gekoeld worden dat wordt voorkomen dat omliggende cellen door de gevormde hitte in thermal runaway raken. Het water moet daartoe in het batterijpakket worden ingebracht zodat het water de verhitte batterijcellen voldoende koelt, waardoor propagatie van de thermal runaway kan worden gestopt.

Daarbij geldt dat veiligheid altijd boven de preferente inzetlocatie (op basis van de hotspots) gaat. Mocht het dus, ook met een eventueel afscherpende straal, niet mogelijk zijn veilig een uhd-blussysteem op de grootste hotspot in te zetten, dan moet op een andere locatie in het batterijpakket worden ingezet. Uit de experimenten is gebleken dat het inbrengen van water gedurende 5 minuten per hotspot in principe voldoende is. De koeling van het ingebrachte water is actief als blijkt dat het water wordt omgezet in stoom. Er is voldoende gekoeld als er geen stoom meer uit het batterijpakket komt. Men dient zich ervan bewust te zijn dat compartimentering ervoor kan zorgen dat water niet alle cellen in thermal runaway kan bereiken, waardoor opnieuw inzetten van het uhd-blussysteem noodzakelijk zal zijn.

Beantwoording onderzoeksvraag 5

Wat zijn geschikte penetratieplekken om een uhd-blussysteem in het batterijpakket te brengen en hoe lang moet het water worden ingebracht op een penetratieplek?

Met het uhd-blussysteem wordt het batterijpakket idealiter gepenetreerd op de plek van de grootste hotspot, mits er een geschikte inzetpositie voor de uhd-bediener is (wat wil zeggen: zonder dat die wordt blootgesteld aan vlammen). Als dit niet mogelijk is, moet een alternatieve locatie worden gezocht. Na inzet op de grootste hotspot kan worden ingezet op de resterende, overgebleven hotspots. Hierbij is circa 5 minuten per hotspot in de meeste gevallen voldoende.

6.2.2 Veilige situatie

Tijdens beide experimenten is in lijn gewerkt met de adviezen van Coldcut Systems. Volgens de ingezette ploegen is deze methode in principe adequaat geweest. In het tijdschema was vastgesteld dat de inzet als succesvol zou worden aangemerkt als er gedurende 45 minuten geen rook- en vlamontwikkeling zichtbaar was en er geen verhoogde temperatuur op de WBC werd gemeten.

Tijdens het tweede experiment was dit het geval en zijn geen rook, vlammen en verhoogde temperatuur meer gemeten in die 45 minuten, waarmee wij concluderen dat de uhd-inzet voldoende in staat was om propagatie van de thermal runaway te stoppen en een stabiele situatie te creëren. Tijdens het eerste experiment bleef echter 45 minuten na de laatste uhd-inzet telkens nog een lichte rookontwikkeling zichtbaar en hebben wij, na zorgvuldig overleg met alle aanwezige experts, ervoor gekozen om het batterijpakket van het voertuig te verwijderen en open te maken. Na inspectie van het batterijpakket hebben wij de volgende argumenten kunnen opstellen om aan te nemen dat de rook niet afkomstig was van een thermal runaway-reactie, maar waarschijnlijk van (na)smeulende bekabeling of isolatiemateriaal.

- > Er werd met de WBC zeer beperkt een verhoogde temperatuur waargenomen.
- > Er werd met de 4-gasmeter wel CO gemeten, maar geen waarde op de LEL-meetcel, die explosieve gassen meet.
- > De visuele kenmerken van de rook waren veel minder heftig dan gewoonlijk bij een thermal runaway.

Er kan worden gesteld dat tijdens het eerste experiment de procedure wel heeft gewerkt voor het stoppen van de thermische propagatie, maar dat er wel een rook producerende reactie in het batterijpakket actief bleef. In essentie is het doel dus wel behaald, namelijk het bereiken van een stabiele situatie. Bovendien breidde het incident zich niet verder uit en op een later tijdstip is ook geen nieuwe thermal runaway waargenomen.

Gezien de constant terugkerende rook bij het eerste experiment zou deze inzet 'op straat' er echter mogelijk toe geleid hebben om de inzet van het uhd-blussysteem als niet succesvol te beschouwen. Om een veilige situatie te garanderen, zou het voertuig naar een locatie zijn getransporteerd waar het kon uitbranden of ondergedompeld kon worden.

Beantwoording onderzoeksvraag 6

Wanneer is een veilige en stabiele situatie gecreëerd en kan het voertuig veilig worden overgedragen aan een bergingsbedrijf?

Het koelend effect van het water is effectief als blijkt dat het wordt omgezet in stoom. Er is voldoende gekoeld als er geen stoom meer uit het batterijpakket komt, en ook geen rook of vlammen worden waargenomen. De uhd-inzet is dan effectief. Zodra er 45 minuten geen zichtbare rook- of vlamontwikkeling meer is geweest, is er sprake van een stabiele situatie. Het voertuig kan dan in principe worden overgedragen aan een berger.

6.3 Praktische toepasbaarheid in Nederland

Om de praktische toepasbaarheid van het uhd-blussysteem bij elektrische voertuigbranden te beoordelen, is van belang om te evalueren hoe het deelnemende brandweerpersoneel de

brandweerinzet tijdens het experiment heeft ervaren. Wij achten de praktische toepasbaarheid goed, als het brandweerpersoneel voldoende positief is over de brandweerinzet, deze niet als te moeilijk heeft ervaren en de ervaren knelpunten oplosbaar dan wel acceptabel zijn. Voor beide criteria hanteren wij een cijfer van 7 of hoger op een schaal van tien.

6.3.1 Gevoel en beleving

De deelnemende brandweerlieden hebben individueel scores toegekend aan hun ervaring van de brandweerinzet tijdens het experiment. Omdat de TS- en de uhd-eenheden een andere taak hadden, zijn deze scores per eenheid gemiddeld. Een 10 geeft een uiterst positief gevoel weer en 1 een uiterst negatief gevoel.

De bemensing van de TS heeft in de ochtend en de middag dezelfde scores toegekend. Zij heeft een gemiddelde score van een 8,4 met een bandbreedte tussen de 8 en 9 gegeven. De Cobra-eenheid heeft voor het experiment in de ochtend gemiddeld een 8,6 met een bandbreedte tussen de 8 en 10 gegeven. De Coolfire-eenheid heeft voor het experiment in de middag een 9 gegeven, met een spreiding tussen de 8 en 10. Hiermee kan worden geconcludeerd dat al het brandweerpersoneel een positief gevoel heeft overgehouden aan de brandweerinzet.

Beantwoording onderzoeksvraag 7

Hoe is het gevoel van de brandweerlieden over de uhd-inzet tijdens het experiment?

Zowel de TS-bemanning als de uhd-eenheid hebben een positief gevoel overgehouden aan de inzet op het elektrische voertuig.

6.3.2 Moeilijkheidsgraad

De deelnemende brandweerlieden hebben ook individueel scores toegekend aan hun ervaring met de moeilijkheidsgraad van de inzet tijdens het experiment. Omdat de TS- en de uhd-eenheden een andere taak hadden, zijn deze per inzet eenheid gemiddeld. Een 10 geeft aan dat de inzet uiterst makkelijk was, en een 1 dat deze uiterst moeilijk was.

De bemensing van de TS heeft in de ochtend en de middag dezelfde scores toegekend. Zij geeft een gemiddelde score van een 9 met een bandbreedte tussen de 8 en 10. De Cobra-eenheid (ochtend) heeft voor het experiment in de ochtend gemiddeld een 9,2 gegeven, met een bandbreedte tussen de 8 en 10. De Coolfire-eenheid (middag) heeft voor het experiment in de middag een 7,8 gegeven, met een spreiding tussen de 7 en 8. Het verschil in de ervaren moeilijkheidsgraad tussen de uhd-eenheid in de ochtend en de middag kan mogelijk verklaard worden door de aanwezigheid van passagiersbanken in het testvoertuig in de middag, omdat deze het enigszins moeilijker maakten om de lans van het uhd-blussysteem goed te plaatsen.

Er kan worden geconcludeerd dat het deelnemende personeel van de TS en de uhd-eenheden de brandweerinzet als relatief makkelijk hebben ervaren. Er dienen echter twee zaken opgemerkt te worden die het lastig maken om deze ervaring te generaliseren naar de praktijk. Ten eerste dat tijdens het experiment de zijdeuren van het voertuig van te voren waren geopend om de kans op een explosie te minimaliseren. In de praktijk zal dit anders zijn. Een uhd-inzet is vanzelfsprekend makkelijker wanneer de deuren geopend zijn. Bij gesloten deuren is eventueel een spreider nodig om ze te openen. Daarnaast is een hotspot lastig dan wel onmogelijk te lokaliseren van buiten met de deur dicht. Ten tweede dat de

uhd-eenheden voorafgaand aan de experimenten een uitgebreide training hebben ontvangen over het optreden met een uhd-blussysteem bij branden in batterijen van elektrische voertuigen, waarmee zij beter voorbereid dan gemiddeld het experiment zijn ingegaan.

Beantwoording onderzoeksvraag 8

Hoe ervaren de brandweerlieden de moeilijkheidsgraad van de uhd-inzet tijdens het experiment?

Zowel de bemensing van de TS als de uhd-eenheid hebben de inzet als relatief makkelijk ervaren. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de uhd-inzet in de praktijk als moeilijker kan worden ervaren, onder meer omdat deuren en ramen niet altijd open zullen zijn.

6.3.3 Aandachtspunten bij de uhd-inzet

In de volgende alinea's worden de knelpunten besproken die de brandweerploegen tijdens hun inzet hebben ervaren.

Gebruik ventilator

Na afloop van het eerste experiment werd door de brandweerploeg opgemerkt dat de ventilator niet optimaal stond gepositioneerd en de rook niet goed werd weggeblazen. Tijdens het tweede experiment viel de ventilator uit, doordat de batterij leeg raakte. Daardoor verminderde het zicht op het batterijpakket. Ook tijdens het tweede experiment stond de ventilator niet optimaal gepositioneerd. De lessen die hieruit geleerd kunnen worden zijn (1) zorg voor degelijk materiaal, maar belangrijker, (2) zorg voor een juiste positionering van de ventilator. Idealiter wordt gewerkt 'met de wind in de rug'. Zorg ervoor dat de ventilator waar nodig van positie wordt gewijzigd, als door omstandigheden bijvoorbeeld blijkt dat het effect van de ventilator onvoldoende is tijdens de inzet.

Werkruimte en monitoring

Tijdens het eerste experiment is aangegeven dat de werkruimte als te beperkt werd ervaren, doordat uhd-bedieners en hun ondersteuners te dicht op elkaar stonden. De les daarbij is, dat een goede afstemming tussen uhd-bedieners en ondersteuners nodig is, zodat er voldoende werkruimte is voor de bediener.

Na het tweede experiment werd het monitoren van de omgeving aangegeven als knelpunt. Hier was tijdens de inzet te weinig aandacht voor. Dit onderstreept het belang van overzicht houden door de bevelvoerder en het waar nodig aanspreken van mensen die in het onveilige werkgebied komen.

Brandvermogen en -duur

Het doel van de brandweer was het veilig en effectief onder controle krijgen van zowel de voertuigbrand als de batterijbrand. De ingezette eenheden tijdens het tweede experiment hebben aangegeven dat de inzet langer duurde dan gehoopt. Zij gaven aan dat het uhd-blussysteem vaker moest worden ingezet dan zij van tevoren hadden verwacht. Ook heeft het brandvermogen van het voertuig de ingezette eenheden tijdens het tweede experiment verrast. Een complicerende factor die benoemd werd door de uhd-eenheid, waren de vlammen die uit het batterijpakket kwamen. Het inzetplan moest hierdoor aangepast worden, bijvoorbeeld door het opbrengen van meer koelend vermogen. Uiteindelijk is de TS-bemensing bijgesprongen om het koelend vermogen op de juiste plek in te brengen.

Twee lessen komen naar voren. De eerste is, dat het belangrijk is om van te voren zowel de TS-bemensing als een uhd-eenheid mee te geven dat dit soort vlammen uit het batterijpakket kunnen blijven ontstaan, en dat daarom actieve koeling nodig is. De tweede les is, dat het soms noodzakelijk is om meerdere malen het uhd-blussysteem in te zetten om propagatie van de thermal runaway tot stoppen te brengen.

Communicatie

De uhd-ploeg die deelnam aan het tweede experiment heeft de communicatie tussen de ploegleden als knelpunt ervaren, zowel bij de persoonlijke mondelinge communicatie als via de portofoon. Dit knelpunt is met name ervaren door de bediener van het uhd-blussysteem. De inzet van een en soms twee lagedrukstralen werkte beperkend in zicht en geluid. Hierdoor werden visuele en geluidssignalen minder goed waargenomen, bijvoorbeeld of en wanneer het uhd-blussysteem door de bovenkant van het batterijpakket was gesneden.

Communicatie hangt in dit geval nauw samen met veiligheid. Inzet van de lagedrukstralen was noodzakelijk om een veilige werkomgeving te creëren, maar belemmert ook de handelingen van de uhd-bediener. De afweging tussen wel of niet inzetten van de lagedrukstralen kan alleen tijdens een incident gemaakt worden: wanneer worden vlammen onderdrukt, en wanneer kan daar eventueel tijdelijk mee gestopt worden om de bediener van het uhd-blussysteem ruimte te geven signalen waar te nemen? Belangrijk is om hier vooraf duidelijke afspraken over te maken tussen de uhd-eenheid en de bemensing van de TS. Daarbij zijn heldere signalen en tekens nodig, die ook te interpreteren zijn als zicht en gehoor beperkt zijn, zodat de uhd-bediener kan communiceren met de straalpijpvoerder.

Een ander communicatiepunt dat is genoemd, is het expliciet noemen van stadia van het incident. Tijdens het eerste experiment is daarnaast aangegeven dat er beter bevestigd had kunnen worden dat er geen risico's meer waren. De les die hieruit getrokken kan worden, is dat in de nafase van een incident duidelijk het moment 'einde incident' moet worden gecommuniceerd

Lans

Een laatste knelpunt dat door de bedieners van het uhd-blussysteem uit het tweede experiment is genoemd, is de keuze voor de lans. In dit geval was de korte lans gekozen, waardoor men dicht op het voertuig moest staan. Leerpunt is om, waar mogelijk, te kiezen voor een langere lans. Dit zorgt voor meer afstand, wat de veiligheid vergroot, en geeft de uhd-bediener meer zicht op wat er in de auto gebeurt.

Beantwoording onderzoeksvraag 9

Welke knelpunten hebben de brandweerlieden gedurende de uhd-inzet tijdens het experiment ervaren?

Aandachtspunten die zijn genoemd door het brandweerpersoneel zijn de beperkte werkruimte, het juist inzetten van ventilatoren, de communicatie en het ontbreken van een langere lans aan het uhd-blussysteem.

6.4 Beschouwing

Voor wat betreft de veiligheid blijkt uit deze analyse dat voor alle drie de effecten van een thermal runaway, namelijk blootstelling aan (onverwachte) fakkels, explosie en toxische gassen, mitigerende veiligheidsmaatregelen zijn gevonden die ook praktisch uitvoerbaar zijn gebleken in de Nederlandse brandweerpraktijk. Voor het beperken van de blootstelling aan (onverwachte) fakkels kunnen gericht lagedrukstralen worden ingezet. Om een explosie te kunnen voorkomen kunnen (eventueel opgehoopte) gassen worden geventileerd en in het geval van een afgesloten passagierscabine kunnen hiervoor de ramen met het uhd-blussysteem kapot worden gespoten. Voor de bescherming tegen toxische gassen bieden de bestaande persoonlijke beschermingsmiddelen en ademlucht voldoende bescherming. Het risico op elektrocutie voor de uhd-bediener is niet van toepassing gebleken wanneer het uhd-blussysteem correct wordt ingezet, en is zeer onwaarschijnlijk wanneer metalen onderdelen van het uhd-blussysteem per ongeluk worden aangeraakt.

Ook is tijdens het experiment gebleken dat de gehanteerde inzetprocedure effectief was. Deze houdt in dat met een WBC hotspots in het batterijpakket worden geïdentificeerd, waarna het batterijpakket met het uhd-blussysteem op de plaats van deze hotspot wordt gepenetreerd. Voorwaarde hiervoor is, dat de uhd-bediener vanaf een veilige inzetlocatie de penetratieplek kan bereiken. Vervolgens dient enkele tot vijf minuten water te worden ingebracht. Zichtbare stoom is een indicatie dat de koeling actief is. Uiteindelijk zal er geen stoomvorming meer zichtbaar zijn bij het inbrengen van water op deze hotspot, maar alleen weglekkend water. Dit dient herhaald te worden, totdat op alle hotspots is ingezet. Het is hierna nodig om het batterijpakket nog een periode visueel te monitoren op rook- en vlamontwikkeling en een verhoogde temperatuur om er zeker van te zijn dat er een stabiele situatie is ontstaan.

Bij beide experimenten is een actieve monitoringsperiode van 45 minuten gehanteerd en is na die 45 minuten geen herontsteking waargenomen. Wel bleef er bij het eerste experiment een lichte rookontwikkeling uit de batterij komen. Er is echter vastgesteld dat die rook niet afkomstig was van een batterijcel in thermal runaway. Een mogelijkheid is dat de lichte rookvorming werd veroorzaakt door smeulende isolatiematerialen of bekabeling. Uit deze gebeurtenis kan worden afgeleid dat het geïnjecteerde water niet alle plekken of kieren in het batterijpakket kan bereiken. In de praktijk kan zich derhalve de situatie voordoen dat een (herhaaldelijke) uhd-inzet als niet succesvol wordt gezien, waardoor het voertuig eventueel alsnog zal worden gedompeld.

Uit de antwoorden en debriefing van de brandweerploegen is gebleken dat zij een positief gevoel hebben overgehouden aan hun inzet en dat zij deze als relatief makkelijk hebben ervaren. Verder is voor de gerapporteerde knelpunten in principe een oplossing denkbaar, die ook praktisch uitvoerbaar is.

Alles in overweging nemend, kan worden gesteld dat het uhd-blussysteem met aanvullende veiligheidsmaatregelen veilig kan worden toegepast op het batterijpakket van elektrische voertuigen en dat hiervoor een effectieve inzetprocedure bestaat die praktisch toepasbaar en uitvoerbaar is door (gespecialiseerde) uhd-eenheden in Nederland.

7 Conclusie

In dit rapport zijn de voorstudie, resultaten en analyse van twee experimenten met de inzet van een uhd-blussysteem op een batterijpakket van een elektrische auto in thermal runaway besproken. Hieruit blijkt dat het praktisch uitvoerbaar is om in Nederland een uhd-blussysteem veilig en effectief in te zetten voor de bestrijding van een instabiel dan wel brandend batterijpakket van een elektrisch voertuig, mits hiervoor een aantal specifieke veiligheidsmaatregelen worden getroffen. Deze veiligheidsmaatregelen zijn:

- > Het inzetten van lagedrukstralen (1) ter onderdrukking van eventuele fakkels uit het batterijpakket, en (2) ter afscherming van de uhd-bediener om die te beschermen tegen blootstelling aan die (onverwachte) fakkels.
- > Vaststellen dat er geen brandbare gassen zijn opgehoopt in of rondom het voertuig. Het kapot spuiten van de ramen met het uhd-blussysteem, eventueel ondersteund door het gebruik van ventilatoren, kunnen helpen om brandbare gassen te ventileren.
- > Positionering van de uhd-bediener en het ander brandweerpersoneel zoveel mogelijk uit de (toxische) rook en vlammen.
- > Gebruik van de lange lans of het verlengstuk van het uhd-blussysteem.

Tijdens het experiment is bevestigd dat er een effectieve inzetprocedure is, die bestaat uit het identificeren van hotspots met een WBC, en het vervolgens penetreren van het batterijpakket en inbrengen van water met het uhd-blussysteem op de plaats van deze hotspots. Stoomvorming is hierbij een indicator dat koeling effectief is en de overgang van stoomvormig naar weglekkend water een indicator dat de inzet effectief is geweest en kan worden beëindigd. Hierna is een periode van visuele monitoring noodzakelijk om er zeker van te zijn dat de situatie is gestabiliseerd en er geen herontsteking plaatsvindt. Door het deelnemende brandweerpersoneel is aangegeven dat deze inzet een positief gevoel heeft opgeleverd en relatief makkelijk is uit te voeren.

Concluderend bieden de resultaten van de brandexperimenten ons voldoende vertrouwen om uhd-blussystemen in te laten zetten door (gespecialiseerde) uhd-eenheden binnen de Nederlandse brandweer bij branden in het batterijpakket van elektrische voertuigen. Op basis van de resultaten van dit onderzoek geven wij hiervoor in hoofdstuk 8 onze aanbevelingen.

8 Aanbevelingen voor handelingsperspectief uhd-inzet

8.1 Inleiding

Uit deze studie is gebleken dat het veilig en effectief is om het uhd-blussysteem in te zetten, mits er aanvullende veiligheidsmaatregelen worden getroffen. In dit hoofdstuk wordt op basis van de uit het experiment verkregen resultaten en de ervaringen van Coldcut Systems (2024) en MSB (2024) een doorvertaling gegeven van onderzoeksresultaten naar aanbevelingen voor een operationeel handelingsperspectief voor Nederlandse uhd-eenheden. Er wordt geredeneerd vanuit het uitgangspunt dat de voertuigbrand, dus de brand in de carrosserie, reeds geblust is. De stappen hiervoor vormen onderdeel van regulier brandweeroptreden.

In dit hoofdstuk wordt aansluiting gezocht bij de gebruikelijke fases van incidentbestrijding: herkennen, verkennen, stabiliseren, bestrijden en nazorg. Daarbij wordt ingegaan op de zaken die relevant zijn voor de keuze om wel of geen een uhd-blussysteem in te zetten, en hoe het systeem ingezet dient te worden. Tot slot wordt besproken welke situaties geschikt zijn om het uhd-blussysteem in te zetten en wanneer alternatieve technieken beter toepasbaar zijn.

Waar in onderstaande paragrafen nummering wordt toegepast, wordt geadviseerd deze stappen in volgorde van nummering uit te voeren. Waar een >-teken staat, hoeft geen specifieke volgorde te worden gehanteerd.

8.2 Herkennen

Zodra het voertuig is geïdentificeerd als een elektrisch aangedreven voertuig, is het van belang naar indicatoren te kijken die aangeven of de batterij bij de brand betrokken is. Niet in alle gevallen is de batterij namelijk betrokken: dit is slechts in circa 20 % van de incidenten in Nederland het geval (Hessels, 2024).

Herkenningsindicatoren voor betrokkenheid van de batterij bij brand zijn:

- > Rook: grijs-witte rook c.q. damp uit het batterijpakket. Veelal met tussenpozen, doordat cellen beurtelings betrokken raken bij een thermal runaway.
- > Vlammen: (steek)vlammen uit openingen rondom het batterijpakket.
- > Geluid: een thermal runaway geeft een ploffend, sissend en/of krakend geluid door de overdruk in de cellen in het batterijpakket of het ontploffen van deze cellen.

- > Warmte: het batterijpakket is warm (te zien met een WBC). Houd er rekening mee dat het warmtebeeld verstoord kan worden door de rookwolk en het feit dat batterijcellen goed zijn ingepakt.

8.3 Verkennen

Tijdens de verkenning wordt zekerheid verkregen over de mogelijke betrokkenheid van het batterijpakket bij de brand.

1. Achterhaal met behulp van de rescue informatie sheet de locatie van het batterijpakket.³
2. Draag tijdens de verkenning ademlucht.
3. Verken of een of meerdere van de bij Herkenning genoemde herkenningsindicatoren aanwezig zijn. Zo ja, dan is er sprake van een thermal runaway.
4. Stel visueel vast of er gasophoping in het voertuig plaatsvindt, bijvoorbeeld als alle deuren en ruiten nog dicht zijn. Als dit het geval is, dan dient eerst een veilige werksituatie te worden gecreëerd (zie Stabiliseren).
 - Let daarbij ook op eventuele gasophopingen in de omgeving van het voertuig, bijvoorbeeld onder een carport.
5. Kijk aan welke zijde van het voertuig de (meeste) gassen en fakkels uit treden. Benader het voertuig en de hotspot vanaf de andere kant. Treed daarbij zoveel mogelijk bovenwinds op.
6. Indien er geen gasophoping kan plaatsvinden, zoek dan met een WBC naar hotspots op de locatie waar de batterij zit. Locaties om te kijken zijn bijvoorbeeld op de vloer van het interieur.

Als is vastgesteld dat het batterijpakket is betrokken:

1. Bepaal met de warmtebeeldcamera de grootste hotspot. Dit wordt de zogeheten *penetratieplek*, waarop de spuitmond van het uhd-blussysteem wordt ingezet.
2. Kijk vervolgens wat de dichtstbijzijnde geschikte *inzetpositie* van de uhd-bediener is. Een geschikte inzetpositie is een positie van waar de uhd-bediener de inzet kan starten, zonder te worden blootgesteld aan vlammen of fakkels vanuit het batterijpakket.
3. Als de dichtstbijzijnde inzetpositie niet vrij is van vlammen, zoek dan een andere geschikte inzetpositie.
4. Als er voor de penetratieplek van de eerste keus geen geschikte inzetpositie is, zoek dan een alternatieve hotspot (penetratieplek) die wel te bereiken is zonder dat de uhd-bediener blootgesteld wordt aan vlammen.

Afweging: oppervlaktewaterverontreiniging

Verontreiniging van het oppervlaktewater dient te worden meegenomen als criterium bij de afweging om wel of niet een uhd-blussysteem in te zetten. Het RIVM heeft gedurende de experimenten bluswatermonsters genomen om de mate van verontreiniging van het bluswater in kaart te brengen. Op basis van de voorlopige resultaten van het RIVM kan gesteld worden dat de inzet van het uhd-blussystemen leidt tot een aanzienlijke toename van vervuiling van het bluswater. Een selectie van de resultaten van het RIVM is weergegeven in Tabel 8.1

Tabel 8.1 Meetwaarden RIVM

| | |
|---|---|
| | |
| Gemiddelde 5 monsters voor inzet uhd (mg/l) | Gemiddelde 2 monsters na inzet uhd (mg/l) |

³ Let erop dat er op afwijkende plaatsen nog batterijen kunnen zitten, bijvoorbeeld door het achteraf inbouwen van een extra batterijpakket.

| | | |
|----|------|-----|
| Li | 10,1 | 286 |
| Mn | 1,7 | 97 |
| Ni | 13,3 | 920 |
| Co | 2,3 | 152 |

De lithiumconcentraties in tabel 8.1 overschrijden de door het RIVM afgeleide indicatieve veilige milieurisicogrens voor acute effecten in oppervlaktewater van 210 µg/l (RIVM, 2023). In deze risicogrens zijn veiligheidsmarges meegenomen en de concentraties in bluswater kunnen niet rechtstreeks worden vergeleken met deze risicogrens. Wanneer echter grote hoeveelheden bluswater met hoge concentraties lithium in een vijver of sloot met weinig uitstroom terechtkomen, kunnen effecten bij waterorganismen optreden. Dit geldt zeker wanneer de lithiumconcentraties hoger zijn dan de concentraties waarbij acute effecten zijn waargenomen in laboratoriumtesten. De laagste relevante effectconcentratie uit de literatuur is 2,1 mg/l.

Uit onderzoek blijkt dat vooral lithium goed oplost in water. Lithium zal zich daardoor snel verspreiden met het bluswater. De verbindingen met mangaan, nikkel en kobalt die bij de brand zijn vrijgekomen, lossen beduidend minder goed op. Deze verbindingen blijven in zware deeltjes op de grond achter, nabij de plek waar het uhd-blussysteem is ingezet. Om deze reden worden acute effecten van deze verbindingen op het watermilieu als minder relevant ingeschat.

Zodoende adviseren het RIVM en NIPV om een uhd-blussysteem niet in te zetten:

- > wanneer het uhd-bluswater kan wegstromen naar kleine waterplassen (kleiner dan +/- 30m x 30m in oppervlakte) waarin weinig uitstroom plaatsvindt. Een voorbeeld hiervan is wanneer het uhd-bluswater direct via de berm de plas in kan stromen, en deze plas bestaat uit stilstaand water.
- > wanneer het uhd-bluswater kan wegstromen naar drinkwaterwingebieden.

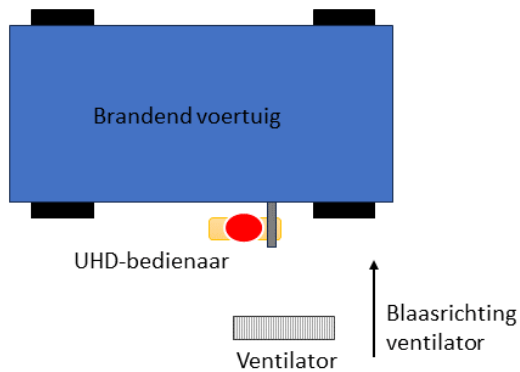
De definitieve rapportage van het RIVM wordt medio begin 2025 verwacht.

8.4 Stabiliseren (van de werksituatie voor uhd-bediener)

Tijdens de stabilisatiefase wordt met veiligheidsmaatregelen een stabiele en veilige werksituatie gecreëerd, voorafgaand aan de inzet van het uhd-blussysteem.

Daartoe kunnen de volgende acties worden uitgezet:

- > Leg één lagedrukstraal klaar ter afscherming van het uhd-personeel.
- > Als er vlammen uit het batterijpakket komen, leg dan een tweede lagedrukstraal klaar ter onderdrukking van de vlammen.
- > Plaats een ventilator op zo'n manier dat de bediener van het uhd-blussysteem tijdens inzet de wind van de ventilator in de rug heeft. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 8.1.



Figuur 8.1 Inzet ventilator

8.4.1 Afgesloten voertuigcabine

Als er sprake is van een afgesloten voertuigcabine, dus wanneer alle ramen en deuren nog dicht zijn, is er een explosierisico door de ophoping van brandbare gassen in het voertuig. In deze situatie is het niet veilig om van dichtbij deuren te openen. Dit geldt ook voor situaties waarbij de gassen zich in de omgeving van het voertuig ophopen, bijvoorbeeld onder een carport of in een garagebox.

In die situaties kunnen met behulp van het uhd-blussysteem (vanaf een bovenwindse positie) op afstand de ramen van het voertuig aan beide zijden kapot worden gespoten. Vervolgens dient afstand worden gehouden, totdat de gassen grotendeels uit het voertuig verdwenen zijn.⁴ Daarbij helpt de nevel van het uhd-blussysteem ook voor het creëren van ventilatie in het voertuig. Gekozen kan worden om ook een ventilator in te zetten. Plaats deze voordat de ruiten worden verwijderd, zodat hij direct kan worden aangezet, nadat de ramen zijn gebroken.

8.5 Bestrijden

Nadat een veilige situatie is gecreëerd, kan het uhd-blussysteem worden ingezet om de propagatie van de thermal runaway in het batterijpakket te stoppen. Geadviseerd wordt, in lijn met Coldcut Systems (2024) en MSB (2024), om de volgende stappen uit te voeren:

1. Mocht de uhd-eenheid over een verlengstuk beschikken, gebruik dit dan ook.
2. Plaats het uhd-blussysteem op de bij 'verkennen' gevonden penetratieplek.
3. Een goede indicator voor de activiteit van de koeling is stoomvorming van verdampend water. Ontstaat na circa één minuut nog geen stoomvorming, zoek dan een andere inzetlocatie.
4. De uhd-blussing kan enkele minuten duren. Zodra er alleen nog maar water uit het batterijpakket komt (en dus geen stoomvorming), is propagatie van de thermal runaway gestopt.
5. Zoek vervolgens met een WBC naar resterende hotspots.
6. Zet het uhd-blussysteem in op eventueel resterende hotspots.
7. Herhaal dit proces tot met de WBC geen hotspots meer worden waargenomen. Als criterium kan worden gehanteerd dat er geen plekken op het batterijpakket met een temperatuur van boven de 50 graden Celsius worden gedetecteerd met de WBC.

⁴ Mocht er sprake zijn van extreem veel rookontwikkeling, dan moet de in te zetten eenheid daarmee wachten tot het voldoende veilig is.

8. Monitor het voertuig 30 minuten met een WBC voor temperatuurverhoging. Monitor daarbij meermaals per minuut.

30 minuten

Er zijn op dit moment nog onvoldoende data waarmee bepaald kan worden wat een voldoende lange tijd is om het voertuig te monitoren op herontsteking. In afstemming met het werkveld is daarom gekozen voor een tijd van 30 minuten als praktisch hanteerbare tijd.

Wees bij inzet van een uhd-blussysteem van de volgende zaken bewust:

- > Batterijen kunnen gecompartmenteerd of ingeschuimd zijn. In dat geval kan water niet door het gehele batterijpakket stromen, waardoor mogelijk niet alle hotspots kunnen worden geblust. Meerdere keren inzetten op de verschillende compartimenten kan daarom noodzakelijk zijn.
- > Schade aan het batterijpakket kan ervoor zorgen dat vaker moet worden ingezet of dat inzetten niet mogelijk is.
- > Bij een schuinstaand voertuig zal het water naar het laagste punt lopen. Waar mogelijk, zet dan aan de hoger gelegen kant van het voertuig het uhd-blussysteem in.

(Propagatie van) thermal runaway gestopt of niet?

De inzet van het uhd-blussysteem is succesvol als er na (meerdere keren) inzetten geen rook meer uit het batterijpakket komt en er met de WBC geen verhoogde temperatuur meer wordt waargenomen. Er is dan een stabiele situatie ontstaan.

Indien er na diverse keren inzetten nog wel rook uit de batterij komt, **kan** er nog sprake zijn van een thermal runaway. Overweeg op dat moment enige tijd (10 tot 15 minuten) geen uhd-blussysteem in te zetten. Indien de hotspot niet groter wordt, de temperatuur niet toeneemt en de rook geen 'puffend' beeld vertoont, dan kan er sprake zijn van bijvoorbeeld brandende isolatie. Als na inzet van het uhd-blussysteem blijkt dat deze rook niet verdwijnt, kan het zijn dat de rook komt vanaf een plek die het water niet kan bereiken. In dat geval heeft uhd-blussing geen toegevoegde waarde. Er is dan sprake van een stabiele situatie: er vindt geen thermal runaway meer plaats.

Loopt de temperatuur in die 10 tot 15 minuten wel op, dan is er nog altijd sprake van een instabiele situatie. Overweeg dan nogmaals de inzet van het uhd-blussysteem, of plaats het voertuig in een dompelcontainer of laat het gecontroleerd uitbranden.

8.6 Nazorg

Als een stabiele situatie is bereikt, dat wil zeggen: er is een dertig minuten geen temperatuur gemeten hoger dan 50 graden Celsius met een WBC, dan kan het incident worden overgedragen aan een derde partij, bijvoorbeeld een berger.

Gezien het risico op herontsteking van het batterijpakket wordt geadviseerd het voertuig op een veilige afstand van andere objecten dan wel voertuigen te plaatsen, zodat geen brandoverslag kan plaatsvinden. Een vuistregel voor een veilige afstand hiertoe is, op basis van een modelberekening, vijf meter (Brans & Reinders, 2024). Ook kan gekozen worden het voertuig in een *droge* dompelcontainer te stallen, die in geval van herontsteking van de batterijen kan worden gevuld.

De ingezette eenheden dienen hun procedure 'schoon werken' op te starten en hun persoonlijke beschermingsmiddelen conform de regionale afspraken ter reiniging aan te bieden.

Bodemvervuiling

Bluswateranalyses van het RIVM tonen aan dat gebruik van uhd-blussystemen significante hoeveelheden schadelijke stoffen in de omgeving kan brengen. Na het wegslepen van de auto kunnen op de plek waar de auto stond nog steeds gevaarlijke concentraties hydroxiden en schadelijke metalen, zoals kobalt- en nikkelverbindingen, op de bodem aanwezig zijn.

Momenteel bestaan er onzekerheden over de hoeveelheden lithium, kobalt en nikkel die vrijkomen bij het gebruik van een Uhd-blussysteem en de bijbehorende milieugevolgen. Het is mogelijk dat er in de toekomst aanvullende technieken en procedures ontwikkeld moeten worden om de vervuiling of de gevolgen daarvan tot een aanvaardbaar niveau terug te brengen.

8.7 Uhd-inzet in relatie tot andere inzettechnieken

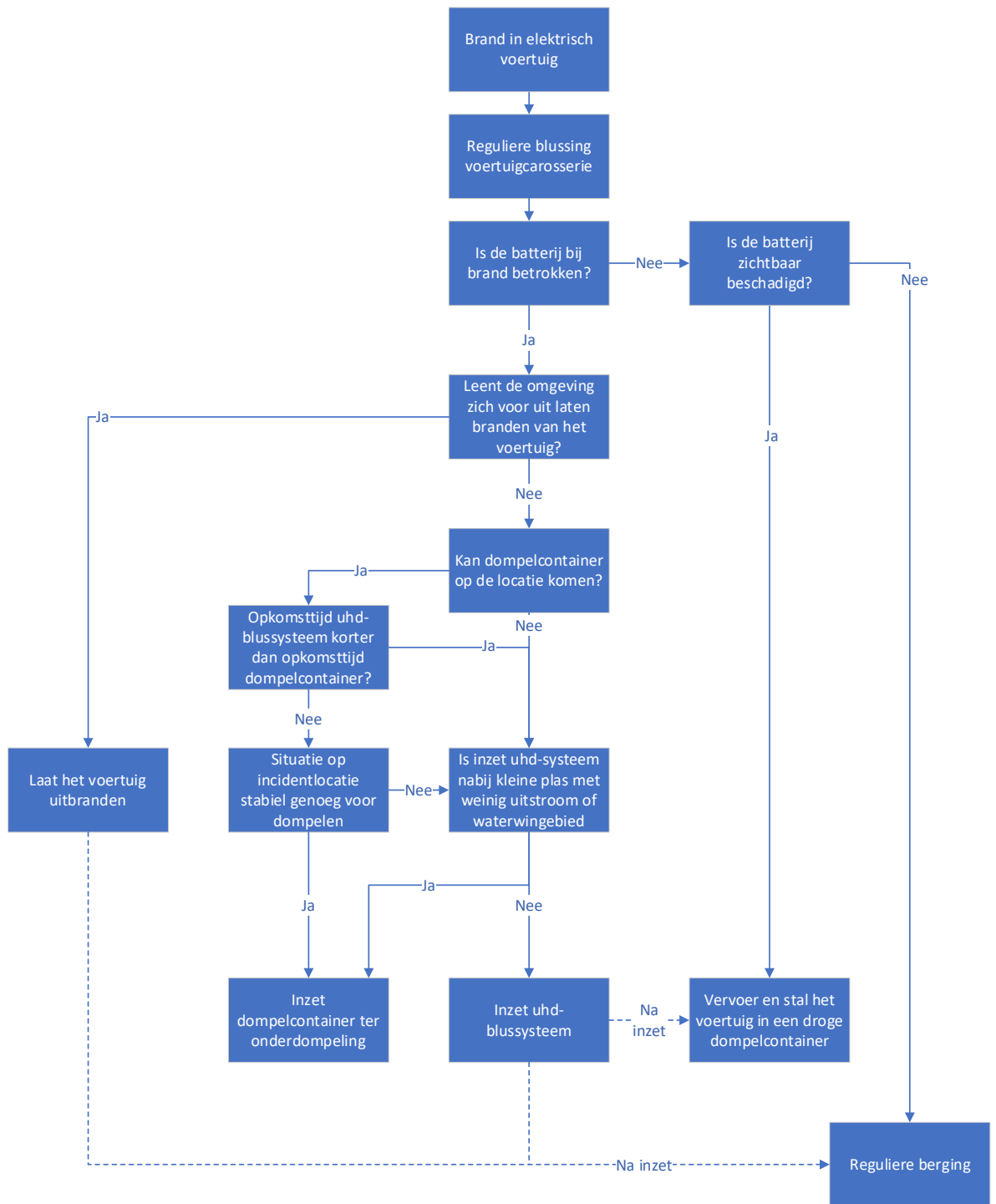
In dit rapport is het uhd-blussysteem beschouwd. Dit is echter niet de enige inzettechniek die kan worden gehanteerd bij branden waarbij het batterijpakket van een elektrisch voertuig is betrokken: de keuze van beschikbare blusmiddelen c.q. -methoden is divers (Hessels & Geertsema, 2023). Het is daarmee 'een tool in de toolbox'. In deze paragraaf wordt het uhd-blussysteem daarom vergeleken met de twee meest gangbare methoden in Nederland: de inzet van de dompelcontainer en het uit laten branden van het voertuig.

De dompelcontainer dient in essentie hetzelfde doel als een uhd-blussysteem: het stoppen van propagatie van de thermal runaway en stabiliseren van het batterijpakket. De dompelcontainer doet dit *indirect* door het binnen laten dringen van water gedurende een lange tijd zonder dit te forceren door aanwezige kieren en mogelijke beschadigingen. Voor de inzet van een dompelcontainer is enkele duizenden liters water benodigd. Een uhd-blussysteem stopt de propagatie van de thermal runaway door het inbrengen van water *direct* in het batterijpakket. Hiervoor is (aanzienlijk) minder water nodig dan bij gebruik van een dompelcontainer. Het voordeel van de dompelcontainer is echter dat deze, als een auto er droog in vervoerd wordt, eveneens als stallingsmiddel kan dienen. In situaties waarin het twijfelachtig is of er sprake is van een thermal runaway, kan het voertuig droog worden vervoerd en in de container worden gestald. Mocht er op een later tijdstip alsnog een thermal runaway optreden, dan kan de berger de container alsnog vullen met water.

Bij de andere inzettechniek, het uit laten branden van het voertuig zal alle (of een groot deel van de) energie uit het batterijpakket in principe opbranden. Daarmee verschilt deze methode van de uhd-inzet en de dompelcontainer. Daar wordt propagatie gestopt, waarbij energie aanwezig blijft in niet-uitgebrande delen van het batterijpakket, zogeheten 'stranded energy' (MSB, 2024). Deze 'stranded energy', ofwel achtergebleven energie, kan op een later moment voor herontsteking zorgen. Bij het uit laten branden van het voertuig wordt deze kans aanzienlijk verkleind. Uit laten branden zorgt daarentegen wel voor een langdurig incident met langere tijd impact op de omgeving. Ook zorgt het voor een grotere emissie van schadelijke stoffen en kan er meer depositie in de directe benedenwindse omgeving terecht komen. De omgeving moet zich dus lenen voor het uit laten branden van het voertuig.

Er zijn met introductie van uhd-blussystemen twee methodes in Nederland om propagatie van de thermal runaway in het batterijpakket te stoppen: dompelen en uhd-blussing, en daarnaast is er de optie van het uit laten branden van het voertuig. Elke methode heeft daarbij haar eigen kenmerken en specifieke randvoorwaarden. Ook kan een rol spelen hoe snel de methode ingezet kan worden: de opkomsttijd van het uhd-blussysteem in relatie tot de opkomsttijd van een dompelcontainer. Er is naar onze mening daarom niet een preferent in te zetten methode; de beste optie hangt af van de situatie.

De bovenstaande overwegingen die een rol spelen bij het maken van de keuze voor een methode zijn weergegeven in figuur 8.2 op de volgende pagina.



Figuur 8.2 Stroomschema brand in elektrisch voertuig⁵

⁵ Het stroomschema biedt geen richtlijn voor de situatie waarin een voertuig niet gecontroleerd kan uitbranden, er geen dompelcontainer beschikbaar is op locatie, en de locatie zich nabij een waterwingebied bevindt. In deze specifieke situatie dient de dienstdoende bevelvoerder een individuele afweging te maken.

Referentielijst

- Brandweeracademie. (2020). *Onderbouwing van risico op elektrocutie/elektrische schok bij incidenten met e-voertuigen*.
- Brans, H. (2023). *NIPV-samenvatting van het ELBAS rapport Incidentbestrijding elektrische voertuigen op schepen*. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/06/20230613-NIPV-Incidentbestrijding-elektrische-voertuigen-op-schepen.pdf>
- Brans, H., & Reinders, J. (2024). *Model voor het berekenen van de warmtestraling van elektrische voertuigbranden*.
- Christensen, P. A., Milojevic, Z., Wise, M. S., Ahmeid, M., Attidekou, P. S., Mrozik, W., Dickmann, N. A., Restuccia, F., Lambert, S. M., & Das, P. K. (2021). Thermal and mechanical abuse of electric vehicle pouch cell modules. *Applied Thermal Engineering*, 189, 116623. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.116623>
- Coldcut Systems. (2023). *Cobra Use Case | Electric Vehicle*. <https://www.coldcutsystems.com/news/cobra-use-case-electric-vehicle/>
- Coldcut Systems. (2024). *Cobra & BEV (Li-Ion) Fires* (p. 55).
- EV Firesafe. (2023, May 7). *EV fire incident management - case study from Prague*. <https://www.evfiresafe.com/post/ev-fire-incident-management-case-study-from-prague>
- EV Firesafe. (2024). *Electric Vehicle Battery Fires 2010 - 30th June 2024*.
- Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., & He, X. (2018). Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. In *Energy Storage Materials* (Vol. 10, pp. 246–267). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.05.013>
- Hessels, T. (2024). *Incidenten met alternatief aangedreven voertuigen jaarrapportage 2023*.
- Hessels, T., & Geertsema, T. (2023). *Onderzoek dompelcontainers*.
- Joppe, K. (2024). *Thermal runaway op een veilige effectieve wijze. Stageverslag NIPV en Hogeschool van Amsterdam*.
- Kang, S., Kwon, M., Yoon Choi, J., & Choi, S. (2023). Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*, 332, 120497. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.120497>
- Kleiman, A. B., Koch, N. S., Flecknoe-Brown, K., Wijsekere, T., Husted, B., Valiente, B., Meehan, S., & Moller, C. (2021). *The ELBAS Project - Electric Vehicle Fires at Sea: New technologies and methods for suppression, containment, and extinguishing of battery car fires onboard ships*.
- MSB. (2023). *Demonstration av släck metod för litiumjonbatterier Metodtillämpning på olika aggregations nivåer-modul, sub-batteri, elbilspack och fordonsnivå*.
- MSB. (2024). *Räddningsinsats där litiumjonbatterier förekommer*.
- NIPV. (2012). *Praktijkexperimenten technieken offensieve buiteninzet*.
- NIPV. (2023). *Brand in opslag van Li-ion accu's - Scenarioboeken*. <https://scenarioboeken.nipv.nl/brand-in-opslag-van-li-ion-accus/>

- Radboud Universiteit. (2023). *Protocol Research Ethics Committee Faculty of Science Radboud University*.
- RIVM. (2021). *Risico's van rook door branden van Li-ion-batterijen*. 1–104. <https://doi.org/10.21945/RIVM-2021-0019>
- RIVM. (2023). *Indicatieve milieurisicogrenzen voor lithium in oppervlaktewater*. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2023-0186.pdf>
- UHD-Blussing.nl. (2024). *Locaties UHD Blussystemen*. <https://uhd-blussing.nl/locaties/>
- Victron Energy. (2023). *Aarding, aarde en elektrische veiligheid*. https://www.victronenergy.com/media/pg/The_Wiring_Unlimited_book/nl/ground,-earth-and-electrical-safety.html
- Vos, J., Brans, H., & Reinders, J. (2024). *Literatuuronderzoek naar de brandeffecten van Lithium-ion batterijbranden*.
- Zhang, G., Wei, X., Tang, X., Zhu, J., Chen, S., & Dai, H. (2021). Internal short circuit mechanisms, experimental approaches and detection methods of lithium-ion batteries for electric vehicles: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110790. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.110790>

Bijlage 1: Methode thermal runaway

De oorzaken van een thermal runaway kunnen worden onderverdeeld in drie categorieën, te weten elektrisch, thermisch en mechanisch. Er zijn in de wetenschappelijke literatuur methodes gevonden om een thermal runaway te veroorzaken in de categorie thermisch en mechanisch. Het betreft methodes op verschillende niveaus, namelijk cel, module, batterijpakket en een volledig elektrisch voertuig (Joppe, 2024).

Thermisch

- > Verwarmingsplaat (intern)
- > Gasbrander (extern).

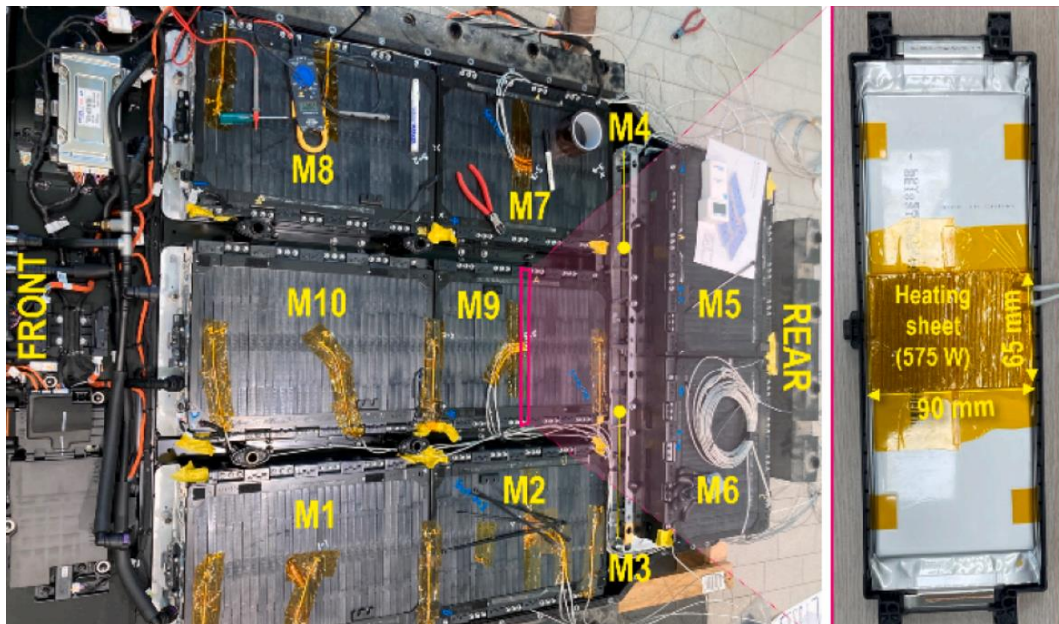
Mechanisch

- > Penetratie met een spijker of schroef.

Uit ons vooronderzoek is gebleken dat de verwarmingsplaat en penetratie met spijker of schroef geschikte methodes zijn voor het experiment (Joppe, 2024). De verwarmingsplaat is veilig, effectief, controleerbaar en voorspelbaar. Daarnaast is de methode gunstig, omdat ze een typisch scenario simuleert. De mechanische methode is in principe ook veilig en effectief, maar minder voorspelbaar en controleerbaar. De mechanische methode is wel sneller in uitvoering. Deze resultaten staan beknopt weergegeven in tabel 4.1. In de volgende twee paragrafen worden de verwarmingsplaat en mechanische methode nader toegelicht.

B1.1 Verwarmingsplaat

Een thermische methode om het batterijpakket in thermal runaway te brengen, is door het batterijpakket intern te verwarmen door middel van een verwarmingsplaat. Een verwarmingsplaat bevat een weerstandsdraad als verwarmingselement, waar een stroom doorheen loopt. De draad wordt verwarmd en geeft zijn warmte af aan de verwarmingsplaat, waardoor de temperatuur van de plaat stijgt (Kang et al., 2023). Er kan een thermokoppel op de verwarmingsplaat worden geplaatst om de temperatuur van de plaat te monitoren. Aan de hand van de gemeten temperatuur kan men de stroomsterkte laten toenemen, waardoor de temperatuur zal stijgen. De temperatuur van de verwarmingsplaat kan op deze manier worden geregeld. In het geval van het batterijpakket zal de verwarmingsplaat op een of meerdere batterijcellen worden gemonteerd, zoals in eerdere experimenten is gedaan (Coldcut Systems, 2023; Kang et al., 2023), waaronder bij een BEV met een batterijpakket van ongeveer 64 kWh (SOC 100 %). In Figuur B1.1 (links) is het batterijpakket van deze BEV zichtbaar met zijn tien modules (M1 t/m M10). De verwarmingsplaat is gemonteerd op een batterijcel van de module in het midden van het batterijpakket (M9, roze rechthoek). Het betreft een verwarmingsplaat van 575 W van 90 x 65 mm die op het oppervlak van de batterijcel is geplakt met hittebestendig tape.



Figuur B1.1: Testopstelling batterijpakket met een gemonteerde verwarmingsplaat (Kang et al. 2023)

Deze methode noodzaakt een modificatie aan het batterijpakket en hiervoor is specifieke vakkennis nodig. De warmte afkomstig van de gemonteerde verwarmingsplaat zal leiden tot een temperatuurstijging in een of meerdere batterijcellen. Het elektrochemische proces zal hierdoor verstoord raken. Bij een temperatuur van ongeveer 135°C kan er kortsluiting ontstaan tussen de kathode en anode, doordat de separator is gesmolten (Feng et al., 2018). De verwarmingsplaat als methode simuleert een typisch scenario voor het ontstaan van een thermal runaway (Kang et al., 2023), die in de meeste gevallen namelijk veroorzaakt wordt door kortsluiting in een batterijcel als gevolg van het falen van de separator (Zhang et al., 2021).

Een ander voordeel is dat er twee verwarmingsplaten kunnen worden gemonteerd op verschillende modules waardoor er op meerdere plekken een initiatie van de thermal runaway kan worden gerealiseerd. Daarnaast is de methode voorspelbaar wat betreft locatie en tijdstip:

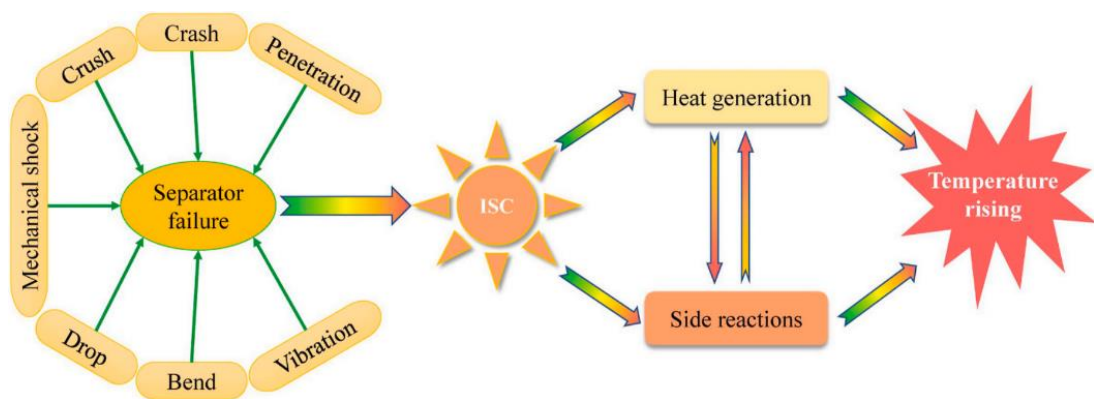
- > Locatie: De verwarmingsplaat wordt voorafgaand aan het experiment gemonteerd op een of meerdere batterijcellen die zich bevinden in een module in het batterijpakket. In deze batterijcellen zal een thermal runaway zeer waarschijnlijk als eerste optreden. De locatie van de thermal runaway is dus op deze wijze te voorspellen.
- > Tijdstip: In het experiment met de BEV was er na 21 minuten en 20 seconden sprake van een thermal runaway (Kang et al. 2023). Er zal dus na ongeveer 20 minuten een thermal runaway kunnen optreden in een van de batterijcellen tijdens het experiment met een uhd-blussysteem. Wanneer er een thermal runaway wordt waargenomen zal er daaropvolgend een snelle brandontwikkeling kunnen optreden. Er was namelijk na ongeveer 25 minuten sprake van brand en na 40 minuten van een volledige voertuigbrand.

Het kunnen voorspellen van het tijdstip en de locatie van het ontstaan van een thermal runaway is gunstig. Een ander voordeel is, dat de temperatuur van de verwarmingsplaat van een veilige afstand kan worden geregeld. Een nadeel en tevens risico van deze methode is

echter, dat de brandbare gassen niet direct ontbranden en zich ophopen in het voertuig, en zo een risico op een explosie veroorzaken.

B1.2 Mechanische Methode

Er kan op mechanische wijze een thermal runaway worden veroorzaakt door middel van het penetreren van een of meerdere batterijcellen met een scherpe stalen staaf (spijker). Deze methode wordt ook wel 'nail penetration' genoemd in de wetenschappelijk literatuur. Om een thermal runaway te veroorzaken, moet de spijker door de behuizing van zowel het batterijpakket als de modules als die van de batterijcel doordringen. Er moet rekening worden gehouden met de ligging van het batterijpakket en daarbij het penetreren van het chassis en de carrosserie. Wanneer de separator in de batterijcel wordt gepenetreerd door de spijker, maakt deze een verbinding tussen de kathode en de elektrode (Zhang et al. 2021). Er kan door de spijker een stroom lopen, waardoor een stroomkring gevormd wordt op de plek van de penetratie. Er ontstaat een interne kortsluiting, ook wel ISC (Internal Short Circuit) genoemd. De kortsluiting leidt tot warmteontwikkeling, waardoor er nevenreacties zullen optreden. De temperatuur zal fors stijgen in de batterijcel, wat uiteindelijk leidt tot een thermal runaway. Dit proces is weergegeven in Figuur B1.2.



Figuur B1.2: Proces na mechanische beïnvloeding batterijcel (Zhang et al. 2021)

Behalve een spijker, kan er ook een schroef worden gebruikt worden om een gat te maken in een batterijcel, aangebracht door middel van een boormachine (P. Malmquist, persoonlijke communicatie, 2 november 2023). Daarvoor kan een lang opzetstuk worden gebruikt van minimaal 2 meter, zodat de schroef op een veilige afstand in het batterijpakket kan worden aangebracht. De lengte van het opzetstuk is ook afhankelijk van de ligging van het batterijpakket en daarbij de carrosserie en het chassis van het voertuig, evenals van dikte van de behuizing van het batterijpakket en de module. De schroef moet zo lang zijn, dat die zich volledig in de batterijcel bevindt, aangezien de druk zal toenemen waardoor de schroef kan bezwijken (P. Malmquist, persoonlijke communicatie, 2 november 2023). De lengte van de schroef is dus ook afhankelijk van de dikte van de batterijcel. Daarnaast moet de schroef bestand zijn tegen hoge temperaturen, aangezien de temperatuur bij een thermal runaway minimaal 200°C is en mogelijk oploopt tot ongeveer 1000°C (Feng et al. 2017).

In een eerder experiment is spijkerpenetratie toegepast bij een enkele module van een elektrisch voertuig (Nissan Leaf) (Christensen et al., 2021). De module bevatte 8 NMC-batterijcellen met een totale capaciteit van 1,64 kWh. Er werden na enkele milliseconden tot

secondes witte rook en fakkels waargenomen afkomstig uit de module. Na het volledig penetreren van een batterijcel werd er dus direct visueel een thermal runaway waargenomen.

De spijker- en schroefmethode zijn in principe hetzelfde; het enige verschil is dat het gat bij de schroefmethode altijd wordt afgesloten (door de schroef zelf). Het gat dat ontstaat door middel van de spijker kan echter ook worden afgesloten door deze simpelweg te laten zitten. Het nadeel van een mechanische methode is dat er schade wordt toegebracht aan het batterijpakket. Daarnaast ontstaat er een gat waar brandbare en toxische gassen uit kunnen ontsnappen, evenals fakkels. Ook is het lastig om bij het batterijpakket te komen, omdat dit zich in de meeste gevallen onder in het voertuig bevindt en is omringd door de carrosserie en het chassis. Het zal enige voorbereidingstijd en geld kosten om een penetratie mogelijk te maken. Hiervoor kan een extern bedrijf moeten worden ingeschakeld met technische kennis.

Een voordeel van een mechanische methode is dat er meerdere pogingen mogelijk zijn, wanneer er bijvoorbeeld aanvankelijk geen batterijcel wordt geraakt. Als er wel een batterijcel wordt geraakt, wordt er waarschijnlijk direct visueel een thermal runaway waargenomen. Een ander voordeel van deze methode is, dat de locatie van het ontstaan van een thermal runaway enigszins voorspelbaar is, en dat er meestal sprake is van een direct tot snel resultaat.

Bijlage 2: Ethisch afwegingskader

In deze bijlage volgt onze onderbouwing bij de onderstaande ethische principes die wij hebben opgesteld voordat het experiment werd uitgevoerd.

1. Wetenschappelijke relevantie: Het onderzoek is wetenschappelijk relevant.
2. Proportionaliteit: De verwachte baten staan in verhouding tot de verwachte inspanningen.
3. Methodologische degelijkheid: De onderzoeker gebruikt de juiste onderzoeksmethoden voor het betreffende onderzoeksprobleem.
4. Risico's en veiligheid: De deelnemers aan het onderzoek moeten zo veilig mogelijk zijn en aan zo min mogelijk risico's worden blootgesteld.
5. Uitvoering: Het onderzoek en de experimenten moeten worden uitgevoerd door gekwalificeerd personeel.
6. Gegevensbeheer: Er moet rekening worden gehouden met de relevante procedures voor gegevensbeheer. Deze hebben onder andere betrekking op gegevensopslag, gegevensverzameling en toegang tot de onderzoeksgegevens.
7. Autonomie: De autonomie van onderzoeksdeelnemers moet worden gerespecteerd.

B2.1 Wetenschappelijke relevantie

In paragraaf 2.3 is toegelicht dat het brandbestrijdingsprobleem van elektrische voertuigen wordt veroorzaakt door de thermal runaway en het feit dat koelwater de batterijcellen slecht kan bereiken bij externe koeling.

Recent onderzoek in Zweden door MSB (Swedish Civil Contingencies Agency) en ook ELBAS hebben aangetoond dat interne koeling (koeling direct op de cellen na het binnendringen van de behuizing van het batterijpakket) efficiënter is om de temperatuur in het batterijpakket te verlagen en uiteindelijk de propagatie van de thermal runaway te stoppen (Kleiman et al., 2021; MSB, 2023). Dit is een indicatie dat het ontwikkelen van een nieuwe brandbestrijdingsmethode die gebruikmaakt van directe koeling de voorkeur kan hebben. De batterij kan dan ter plaatse worden gestabiliseerd, wat efficiënter en tijdbesparend kan zijn. Brandbestrijdingsinstructies en -procedures voor het gebruik van uhd-blussystemen bij branden in elektrische voertuigen bestaan echter nog niet.

De nieuwe procedure kan vooral interessant zijn voor grotere en zwaardere elektrische voertuigen en voor voertuigen op moeilijk bereikbare locaties. Voor deze situaties bestaan op dit moment namelijk nog geen handelingsperspectieven. Om deze redenen zijn wij van mening dat onderzoek naar nieuwe bestrijdingstechnieken voor elektrische voertuigbranden wetenschappelijk relevant is.

B2.2 Proportionaliteit

Het doel van dit onderzoek is om de effectiviteit en toepasbaarheid van een uhd-blussysteem te onderzoeken bij een elektrische voertuigbrand waarbij het batterijpakket is betrokken. Recent onderzoek in Zweden door MSB heeft aangetoond dat de methode effectief is bij een los batterijpakket. Om ook een uitspraak te kunnen doen over de efficiëntie in een praktijksituatie, is het noodzakelijk om het uhd-blussysteem ook op een volledig elektrisch voertuig te testen met een brandweerploeg

Daarvoor dient afgewogen te worden hoeveel elektrische voertuigbranden we willen uitvoeren. Ons experimenteel doel is in eerste instantie om de toepasbaarheid en effectiviteit van het uhd-blussysteem te testen. Met deze uitkomst wordt vervolgens bepaald of we willen investeren in vervolgonderzoek voor de ontwikkeling van richtlijnen en instructies voor de bediening van het uhd-blussysteem voor de bestrijding van elektrische voertuigbranden door brandweerpersoneel. Hoewel er verschillende modellen elektrische voertuigen bestaan, zijn de oorzaken van de problematiek bij de brandbestrijding identiek. Deze zijn namelijk intrinsiek aan het basisvoertuigontwerp en de kenmerken van de lithium-ion batterij. Om die reden achten wij de uitkomsten van een test op één type elektrisch voertuig in voldoende mate indicatief voor het beoogde doel. Wij hebben ervoor gekozen om twee elektrische voertuigen te testen, zodat wij praktische leerpunten en opstartproblemen uit de eerste test direct kunnen meenemen en verbeteren in de tweede test. Met deze gefaseerde aanpak, waarbij we in eerste instantie twee brandproeven uitvoeren, vinden wij dat de inspanningen in een goede verhouding staan tot het verwachte resultaat.

B2.3 Methodologische degelijkheid

Alvorens het experimenteel plan op te stellen, is een vooronderzoek uitgevoerd. Het vooronderzoek had als doel om voort te bouwen op de kennis en ervaring van anderen en met betrokkenen in contact te komen. Hiervoor is een literatuurstudie uitgevoerd en zijn een werkbezoek en interviews gehouden. Op deze manier is een zo compleet mogelijk beeld verkregen van de reeds beschikbare kennis en ervaring over het in thermal runaway brengen van een elektrische auto en het gebruik van het uhd-blussysteem op batterijpakketten. Tevens heeft dit ons een geschikt kennisnetwerk opgeleverd om de resultaten van ons onderzoek mee te bespreken en te delen.

De achtergrondinformatie uit het vooronderzoek vormde de experimenteel-technische basis van het experimenteel plan. Voor het vaststellen van de brandweerinzet tijdens het experiment hebben wij onderzoeksprotocollen van eerdere relevante experimenten bestudeerd, onder meer naar rookgaskoeling. Hierop voortbouwend hebben wij gesprekken gevoerd met brandweermensen die ervaring hebben met de Coldcut Cobra. De inzetprocedure is vervolgens in samenspraak met de in te zetten brandweerploeg vastgesteld. Er zijn experts van Coldcut Systems zelf geraadpleegd om de brandweerploeg te scholen.

De combinatie van (1) een vooronderzoek naar de experimenteel-technische aspecten van het in thermal runaway brengen van een batterijpakket, (2) het opbouwen van een kennisnetwerk en (3) het in samenspraak met ervaren brandweerpersoneel vaststellen van de brandweerinzet, achten wij een methodologisch degelijke aanpak voor het betreffende onderzoeksprobleem.

B2.4 Risico's en Veiligheid

Bij mechanische beschadiging van een batterij kan direct een fakkel ontstaan uit de aangestaste batterijcel(len). Dit blijkt uit beeldmateriaal en het bijwonen van eerdere experimenten. Het heeft daarom de voorkeur om de thermal runaway op afstand te kunnen initiëren. De aard van het experiment maakt het echter onmogelijk om blootstelling aan risico's voor de brandweerploeg volledig uit te sluiten, aangezien zij het brandende voertuig tot dichtbij zullen benaderen. We zullen daarom mitigerende maatregelen treffen om de effecten van mogelijke veiligheidsrisico's tijdens de brandweerinzet zoveel mogelijk te beperken. Daarnaast zullen tijdens het gehele experiment een oefenleider en veiligheidsfunctionaris toezicht houden.

Uit ons eerdere onderzoek (NIPV, 2023) is gebleken dat er drie effecten zijn bij een thermal runaway, namelijk een (1) batterijbrand met fakkels, (2) een dampwolkexplosie en (3) een toxische wolk. Wegschietende cellen worden bij voertuigbranden zelden waargenomen; hiertegen zijn in de huidige protocollen dan ook geen maatregelen opgenomen. In onderstaande tabel is weergegeven hoe we de blootstelling aan gevaar van elk van deze effecten willen beperken voor de brandweerploeg. Voor wat betreft het gevaar van elektrocutie is contact geweest met MSB. Dat gevaar is volgens deze organisatie minimaal, maar zal voor de zekerheid nog worden getest in een deelexperiment beschreven in paragraaf 4.2 (J. Hellsten en A. Trewé, persoonlijke communicatie, 17 en 18 juli 2023).

| Gevaar | Maatregel |
|---|---|
| (Spontane) fakkels uit aangestaste batterijcellen | Achter de persoon die het uhd-blussysteem bedient, staat altijd een tweede persoon met een gebruiksklare lagedruk straal, die de fakkel direct met water besproeit. Omdat de druk-ontlastingsventielen recht naar boven uitmonden, hoeft het voertuig niet vanaf een specifieke richting benaderd te worden. |
| Dampwolkexplosie | Het experiment zal worden uitgevoerd met open ramen, waardoor geen drukopbouw in het voertuigchassis kan plaatsvinden. Bovendien wordt er geen actie nabij het voertuig ondernomen, totdat er een ontsteking heeft plaatsgevonden. |
| Toxische wolk | De brandweerploeg draagt altijd persoonlijke beschermingsmiddelen en ademlucht. In het geval ze zichtbaar in de toxische wolk heeft gestaan, worden de bluspakken ontsmet. |
| Elektrocutie | Voorafgaand aan de brandexperimenten worden stroomgeleidingstesten uitgevoerd om een overtuigend beeld te verkrijgen van het elektrocutierisico. |

Een dompelcontainer is aanwezig om het incident te stabiliseren als tijdens de brandweerinzet blijkt dat het uhd-blussysteem geen of onvoldoende effect heeft. Mocht het experiment om wat voor oorzaak dan ook escaleren, dan is een tweede brandweerploeg direct ter plaatse om te assisteren.

B2.5 Uitvoering

Het NIPV is bij wet vastgelegd als het publieke kennisinstituut voor crisisbeheersing en brandweezorg. Onderzoekers van het NIPV met gedegen kennis over en ervaring met batterijveiligheid en incidentbestrijding hebben dit experiment voorbereid en opgezet. Hun onafhankelijkheid is gewaarborgd door de directie.

De in te zetten brandweerploeg bestaat uit volledig gekwalificeerde brandweermensen die extra training hebben gehad voor het gebruiken van een uhd-blussysteem. Ter aanvulling zijn er gecertificeerde instructeurs van Coldcut Systems aanwezig om aanvullende instructies te geven en ervaringen te delen over het experiment dat in samenwerking met MSB in Zweden is uitgevoerd.

B2.6 Gegevensbeheer

Niet van toepassing.

B2.7 Autonomie


Met de hieronder beschreven aanpak tijdens het experiment streven wij ernaar om de autonomie van de brandweerploeg te respecteren.

Alle leden van de brandweerploeg geven zelf hun bereidheid aan om mee te doen. Daarvoor krijgen zij de gelegenheid om voorafgaand het onderzoeksvoorstel en projectdossier door te lezen en vragen te stellen aan de onderzoekers. In aanloop naar de testdag kunnen zij hun beoogde inzet bespreken met de instructeur van Cobra.

Tijdens de brandweerinzet heeft de bevelvoerder het uiteindelijke commando over de brandweerploeg. Het testprotocol biedt handvatten, maar geen strikte kaders voor de brandbestrijding. De brandweerploeg heeft de vrijheid om naar eigen inzicht hieraan invulling te geven binnen de gestelde doelen.

De oefenleider heeft de leiding over het experiment en kan altijd de test afbreken. De bevelvoerder kan altijd besluiten om zich terug te trekken en de test te onderbreken. Als de bevelvoerder besluit om zich terug te trekken of de test kort wil onderbreken, dan treedt hij in overleg met de oefenleider. Na dit overleg kan worden besloten om de test te hervatten of af te breken. De bevelvoerder geeft zelf zijn instemming en bereidheid aan om het experiment in deze situatie te hervatten. De oefenleider geeft vervolgens toestemming om de test te hervatten. Als wordt besloten om de test af te breken, dan wordt de dompelcontainer ingezet om het voertuig te stabiliseren.

Bijlage 3: Tijdsverloop ochtend

| Tijdstip | Moment | Foto | Overig |
|----------|--|--|--------|
| 9:47 | Startsein gegeven | n.v.t. | |
| 9:50 | Eerste gat wordt geboord, er ontstaat direct een witte rookpluim die snel afneemt. |  | |

9:52 Er ontstaat opnieuw rook.



9:53 Net toen de rook begon af te nemen, ontstond er een nieuw rookpluimpje, dat wederom afnam.



9:58 Er is al enige tijd geen rook zichtbaar, waarna wordt besloten om een tweede gat te boren.



10:03 Het tweede gat wordt geboord. Deze boor poging mislukt



10:04 Er wordt een derde boorpoging opgestart.



10:04 Er ontstaat (nog voor het boren) een zwarte rookwolk en er is vuur zichtbaar. Dit werd iets kleiner, waarna het opnieuw oplaaide. De timer die op tien minuten staat wordt gestart.



10:07 De brand is op gang gekomen (de voertuigbrand ontwikkelt zich) en het voertuig brandt flink.



10:08 Er komt een kort blazend geluid uit het accupakket vandaan.



10:13 De eerste eenheid wordt opgeroepen.



10:14 De eerste eenheid komt ter plaatse en maakt zich gereed voor de inzet.



10:16 Het voertuig wordt vanaf +/- vijf meter vanaf beide zijkanten geblust met twee stralen lage druk.



10:17 De brand is afgenomen.



10:18 De resterende brandhaarden worden nu met een straal lage druk op een afstand vanaf kortbij bestreden.



10:20 De uhd-eenheid wordt ingelicht.



10:22 De motorkap wordt door de eerste TS geopend en afgeblust.



10:24 Het accupakket wordt continu met twee stralen gekoeld.



10:25 Vlammen aan de onderzijde van de auto zijn zichtbaar in fases.



10:25 De uhd-eenheid is ter plaatse. Er vindt direct afstemmingsoverleg plaats tussen de bevelvoerder van de TS en de bevelvoerder van de uhd-eenheid



10:28 De ventilator wordt geplaatst aan de rechterzijde en aangezet.



10:32 Het uhd-blussysteem wordt ingezet aan de rechterzijde.



10:36 De uhd-inzet wordt gestaakt en de ventilator wordt uitgezet.



10:37 Met de WBC worden metingen verricht rondom het voertuig.



10:40 Het uhd-blussysteem wordt opnieuw ingezet, aan de linkerzijde van de auto



10:43 De uhd-inzet wordt gestaakt.



10:57 Er wordt na monitoring een hotspot waargenomen. Besloten wordt de uhd opnieuw in te zetten.



11:01 De uhd wordt opnieuw ingezet.



11:05 De uhd-inzet wordt gestaakt.



11:11 Er wordt opnieuw rook waargenomen rondom het accupakket. Besloten wordt het uhd-blussysteem opnieuw in te zetten

Van dit moment is geen beeldmateriaal meer beschikbaar

11:30 Nadat het uhd-blussysteem nogmaals kortstondig is ingezet, wordt de inzet gestaakt.

Van dit moment is geen beeldmateriaal beschikbaar

11:45 Opnieuw wordt witte rook uit het batterijpakket waargenomen. Deze rook vertoont een constant, gelijkblijvend verloop.

Van dit moment is geen beeldmateriaal beschikbaar

Bijlage 4: Tijdsverloop middag

| Tijdstip | Moment | Foto | Opmerkingen |
|----------|---|--|-------------|
| 14:10 | Startsein gegeven. Het eerst gat wordt geboord. |  | |

14:13

Er ontstond snel zwarte rook en vlammen waren snel zichtbaar, de auto brandt.



14:14

“



14:16

De auto staat volledig in brand, alleen het motorcompartiment nog niet. Er ontstaat sluiting in het voertuig waardoor de koplampen gaan knipperen.



14:17

Er komt een fakkel uit het accupakket.



Rechts, onder de vloer van de auto.

14:19 De voorruit springt.



Rondvliegende glasscherven zijn zichtbaar op het beeld.

14:21 Er was een knal hoorbaar met gelijktijdig vonken zichtbaar vanuit het accupakket.



De witte vuurbal in het midden van de auto is het gevolg van de knal, lijkend op een (kleine) explosie.

14:22 De eerste eenheid arriveert.



14:23 Er wordt vanaf de voorkant op een afstand van +/- 5 meter vanaf de linker- en rechterzijden met twee stralen lage druk geblust. Het ploffen van waarschijnlijk cellen is hoorbaar. De rook wordt langzamerhand wit.



14:23 +
10 sec.



14:23 +
20 sec.



14:25

Het blussen wordt kortstondig gepauzeerd, waarna het verder gaat met een straal lage druk.



14:27

De uhd-eenheid wordt opgeroepen.

Niet op beeld.

14:29

De brand laait opnieuw flink op. Het blussen met lage druk gaat verder, meer op de onderzijde van het voertuig gericht. Er ontstaan steeds duidelijk zichtbare terugkerende gasbranden als gevolg van het afblazen van batterijen uit accupakket.



14:32 De uhd-eenheid arriveert en maakt zich gereed voor de inzet.



14:37 Een ventilator wordt geplaatst. Tot nu toe bemoeilijken vlammen vanaf de onderzijde de inzet van de uhd-eenheid. Deze vlammen zijn afkomstig uit het batterijpakket.



14:42 De uhd-eenheid wordt ingezet.



Tijdstip niet synchroon tussen timer notulist en timer video.

14:49 De uhd-inzet wordt gestaakt.



14:50 De uhd-eenheid wordt opnieuw ingezet op een andere hotspot.



14:51 De uhd-inzet wordt gestaakt.



14:53

De uhd-eenheid wordt opnieuw ingezet op een andere hotspot.



Let op, tijd van deze camerahoek loopt niet synchroon met de tijdlijn van de notulist in de linker kolom van deze tabel.

14:55

De uhd-inzet wordt gestaakt.



Let op, tijd van deze camerahoek loopt niet synchroon met de tijdlijn van de notulist in de linker kolom van deze tabel.

14:56 Het motorruim wordt nageblust.



Betreft de brandweerman met de straal aan de rechterzijde van de foto, links van het brandweervoertuig.

14:57 Opnieuw laaien vlammen op aan de onderzijde.



14:58

De vlammen aan de onderzijde worden met twee stralen lage druk vanaf de onderkant bestreden.



15:00

De vlammen zijn uit en er wordt met een straal lage druk nageblust.



15:03

Er blijven vlammen oplaaien aan de onderzijde, die worden bestreden met een straal lage druk.



Vlammen zijn zichtbaar in het midden van de foto.

15:07

Het uhd-blussysteem wordt ingezet op een hotspot aan de voorzijde van het batterijpakket.



15:10 De uhd-inzet wordt gestaakt.



15:13 Er wordt nageblust met een straal lage druk.



15:21

Na enige tijd ontstaat lichte rook. Er wordt afgeblust.

