Nederlands Instituut Publieke Veiligheid

Inzet van UHD-blussystemen bij branden in batterijpakketten van elektrische vrachtwagens

Praktijkexperiment



Nederlandse Academie voor
Crisisbeheersing en Brandweerzorg
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.nipv.nl
info@nipv.nl
088 274 74 00

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2026

Auteurs	H. Brans en T. Hessels
Met medewerking van	BITET-leden, R. van den Ende (VRH) en H. Nederhoff (VRU)
Contactpersoon	T. Hessels
Datum	18 november 2026
Coverfoto	NIPV

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

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid is bij wet vastgelegd onder de naam Instituut Fysieke Veiligheid.

Abstract

The energy transition is leading to a rapid increase in the number of electric lorries on Dutch roads and at construction sites. Whilst experience has now been gained with ultra-high-pressure cutting and extinguishing systems (UHP extinguishing systems) in relation to battery fires in electric passenger cars, there is still no proven effective method for tackling fires in the battery packs of electric lorries. The NIPV has therefore, in collaboration with the BITET consortium, investigated whether a UHP extinguishing system is (1) safe, (2) effective and (3) practicable for use in battery fires in electric lorries.

For the study, two full-scale field experiments were carried out using lorries, each equipped with two LFP battery packs of 100 kWh each and a combustible load of sixty wooden pallets. The battery pack used consisted of three physically separate battery modules with a plastic casing; each battery module comprised three rows of prismatic LFP battery cells. In both experiments, thermal runaway was initiated by mechanical penetration of one or two battery modules, followed by manual ignition of the load, after which a realistic vehicle fire developed, involving both the load and the battery pack. After the fire crews had tackled the vehicle and load fires using low-pressure water jets, a UHP extinguishing system was deployed to tackle the battery fire by injecting water directly into the battery pack. Temperature measurements, human observations, video footage and evaluations with the firefighters involved formed the basis for the analysis of the safety, effectiveness and practical applicability of UHP deployment in battery fires in electric lorries.

The experiments show that UHP deployment on the battery pack of an electric lorry can be carried out safely under certain conditions. The following safety measures are necessary for this: (1) shielding the UHP operator with at least two low-pressure jets to protect against flare-up phenomena and prevent the fire from spreading to other battery packs and pressurised vehicle components, (2) ventilation and monitoring of battery gases to prevent gas build-up and explosive situations, (3) limiting exposure to toxic smoke, in addition to wearing personal protective equipment, including breathing apparatus, and implementing occupational health and safety measures, (4) ensuring a safe overall fire service operation with due regard for the working environment, and (5) the use of an extended lance with a minimum length of 130 cm.

In terms of effectiveness, both experiments showed that, following a successful UHP deployment, the temperature in the affected battery module fell from approximately 500 °C to around 100 °C within 1 to 5 minutes. This rapid cooling was accompanied by noticeable steam formation, indicating effective heat removal. No temperatures indicating further thermal propagation were measured in the other modules and battery packs. The post-incident fire investigation of the battery pack confirmed that the thermal runaway was confined to the modules where it had been initiated. It has therefore been demonstrated that the UHP extinguishing system accelerated the stabilisation of a battery pack. However, based on the experiments carried out, it was not possible to determine directly to what extent the UHP suppression system contributed to halting cell-to-cell propagation. It has, however,

been shown that the UHP suppression system helps to prevent module-to-module and pack-to-pack propagation.

At the same time, the research shows that effectiveness is highly dependent on the ability to locate and access the battery module in which the thermal runaway is occurring. Due to the construction of the battery pack, thermal imaging cameras proved to be of only limited use for this purpose. Whilst a thermal imaging camera did provide some assistance, it offered no certainty as to the location of the battery module in which the thermal runaway was occurring. In practice, it may therefore be necessary to carry out multiple UHP penetration attempts based on an assessment of the most likely location of the thermal runaway.

The practical applicability of the UHP extinguishing system was assessed as predominantly positive by the participating firefighters; however, it became apparent that effective cooperation between fire engine crews and UHP teams is essential. In particular, clear communication, the allocation of tasks and roles, and a shared awareness of the overall situation are key prerequisites for a safe and effective deployment.

The results show that, provided the mentioned safety measures are observed, the UHP deployment tactic can offer a viable option for tackling battery fires in electric lorries. However, a successful UHP deployment requires specialist knowledge and training and depends on the ability to locate and access the critical battery module, on effective cooperation between the units involved, and on the conditions at the scene.

Samenvatting

De energietransitie leidt tot een snelle toename van elektrische vrachtwagens op de Nederlandse wegen en bouwplaatsen. Hoewel met batterijbranden in elektrische personenauto's inmiddels ervaring is opgedaan met ultrahogedruk snij- en blussystemen (UHD-blussystemen), ontbreekt voor de batterijpakketten van elektrische vrachtwagens nog een bewezen effectieve bestrijdingsmethode. Daarom heeft het NIPV in samenwerking met het BITET-consortium onderzocht of een UHD-blussysteem (1) veilig, (2) effectief en (3) praktisch inzetbaar is bij batterijbranden in elektrische vrachtwagens.

Voor het onderzoek zijn twee full-scale praktijkexperimenten uitgevoerd met vrachtwagens die elk waren uitgerust met twee LFP-batterijpakketten van elk 100 kWh en een brandbare lading van zestig houten pallets. Het gebruikte batterijpakket bestond uit drie fysiek gescheiden batterijmodules met een kunststof behuizing; elke batterijmodule bestond uit drie rijen met prismatische LFP-batterijcellen. In beide experimenten werd thermal runaway door mechanische penetratie in een of twee batterijmodule(s) geïnitieerd en de lading ontstoken, waarna zich een realistische voertuigbrand ontwikkelde, waarbij zowel de lading als het batterijpakket betrokken waren. Nadat de brandweereenheden de voertuig- en ladingbrand hadden bestreden met lagedrukstralen, werd een UHD-blussysteem ingezet om de batterijbrand te bestrijden door water rechtstreeks in het batterijpakket te injecteren. Temperatuurmetingen, menselijke observaties, videobeelden en evaluaties met de betrokken brandweermensen vormden de basis voor de analyse van de veiligheid, effectiviteit en praktische toepasbaarheid van de UHD-inzet bij batterijbranden in elektrische vrachtwagens.

De experimenten laten zien dat een UHD-inzet op het batterijpakket van een elektrische vrachtwagen onder voorwaarden veilig kan worden uitgevoerd. Noodzakelijk hiervoor zijn de volgende veiligheidsmaatregelen: (1) afscherming van de UHD-bediener met ten minste twee lagedrukstralen als bescherming tegen fakkelverschijnselen en het voorkomen van brandoverslag naar andere batterijpakketten en drukhoudende voertuigonderdelen, (2) ventilatie en monitoring van batterijgassen om gasophopingen en explosieve situaties te voorkomen, (3) het beperken van blootstelling aan toxische rook in aanvulling op het dragen van persoonlijke beschermingsmiddelen inclusief ademlucht en toepassing van arbeidshygiënische maatregelen, (4) het waarborgen van een veilige algehele brandweerinzet met aandacht voor de werkomgeving, en (5) het gebruik van een lans met een minimale lengte van 130 cm.

Voor wat betreft de effectiviteit laten beide experimenten zien dat de temperatuur in de getroffen batterijmodule na een succesvolle UHD-inzet daalde van circa 500 °C naar ongeveer 100 °C binnen 1 tot 5 minuten. Deze snelle afkoeling ging gepaard met duidelijke stoomvorming, wat wijst op effectieve warmteonttrekking. In de overige modules en batterijpakketten werden geen temperaturen gemeten die wezen op verdere thermische propagatie. Het brandonderzoek van het batterijpakket na afloop bevestigde dat de thermal runaway beperkt bleef tot de geïnitieerde modules. Het is dus gebleken dat het UHD-blussysteem zorgde voor het versneld stabiliseren van een batterijpakket. Op basis van de uitgevoerde experimenten kon echter niet direct worden vastgesteld in hoeverre het UHD-

blussysteem bijdroeg aan het stoppen van cel-cel-propagatie. Wel is het aannemelijk gebleken dat het UHD-blussysteem bijdraagt aan het voorkomen van module-module-propagatie en pakket-pakketpropagatie.

Tegelijkertijd laat het onderzoek zien dat de effectiviteit sterk afhankelijk is van het kunnen lokaliseren en bereiken van de batterijmodule waarin de thermal runaway plaatsvindt. Door de constructie van het batterijpakket bleken warmtebeeldcamera's hiervoor slechts beperkt geschikt. Een warmtebeeldcamera bood wel ondersteuning, maar geen zekerheid over de locatie van de batterijmodule waarin de thermal runaway plaatsvond. In de praktijk kan het daarom noodzakelijk zijn meerdere UHD-penetratiepogingen uit te voeren op basis van een inschatting van de meest waarschijnlijke locatie van de thermal runaway.

De praktische toepasbaarheid van het UHD-blussysteem werd door de deelnemende brandweermensen overwegend positief beoordeeld; wel bleek dat een goede samenwerking tussen tankautospuitploegen en UHD-teams essentieel is. Met name duidelijke communicatie, taak- en rolverdeling en gezamenlijk bewustzijn van de algehele situatie zijn belangrijke voorwaarden voor een veilige en effectieve inzet.

De resultaten laten zien dat de UHD-inzettactiek met inachtneming van de genoemde veiligheidsmaatregelen een inzetmogelijkheid kan bieden bij batterijbranden van elektrische vrachtwagens. Een succesvolle UHD-inzet vereist echter specialistische kennis en training en is afhankelijk van het kunnen lokaliseren en bereiken van de kritische batterijmodule, van een goede samenwerking tussen betrokken eenheden en van de omstandigheden ter plaatse.

Voorwoord

Het BITET-consortium bestaan reeds enkele jaren. BITET is de afkorting voor BrandweerInzetTactieken EnergieTransitie. Het consortium heeft als doel bestaande inzettactieken op het gebied van zowel materiaal, materieel als tactiek te testen en te valideren als het gaat om nieuwe ontwikkelingen binnen de energietransitie.

In 2024 beproefden we samen met het consortium het ultrahogedruk snij- en blussysteem op twee elektrische bestelwagens. Uit deze beproevingen bleek dat een dergelijk systeem veilig en effectief kan worden ingezet op een instabiel of brandend batterijpakket van een elektrisch voertuig, met inachtneming van een aantal veiligheidsmaatregelen.

Ondertussen zien we het aantal elektrisch aangedreven vrachtwagens en ander zwaar zero-emissie-materieel, zoals bouwmachines, snel groeien. Ze verschillen op diverse terreinen van elektrisch personenwagens, zoals batterij-chemie, batterijinhoud en batterijpositionering. BITET heeft deze ontwikkeling aangegrepen om het UHD-systeem in de praktijk te testen op e-trucks. Dit zijn wereldwijd unieke beproevingen geweest. Het realiseren van deze real-life experimenten is niet alleen een grote wetenschappelijke uitdaging geweest. Ook de financiën, organisatie en de logistiek eromheen waren gigantisch. Een voorbereiding van ruim anderhalf jaar, met tientallen instanties en medewerkers, heeft aan de basis gestaan van twee geslaagde testdagen.

Vele instanties zijn wij dank verschuldigd. Enkele wil ik bij naam noemen omwille van hun cruciale kosteloze inbreng bij deze beproevingen. Zo hebben de RVO, Rijkswaterstaat, Gezamenlijke Brandweer en het LEC IV financieel bijgedragen. Zonder hen geen middelen, en zonder middelen geen experimenten. Daarnaast moeten TVM-verzekeringen genoemd worden voor het beschikbaar stellen van de trucks en DAF-trucks voor de beschikbaar gestelde batterijen. Het RIVM voor de metingen betreffende de milieubelastingen, en Kenbri en Coldcut Systems voor het ter beschikking stellen van een UHD-blussysteem respectievelijk de ondersteuning met expertise.

Natuurlijk mogen de partners in het BITET-consortium niet ontbreken: de Gezamenlijke Brandweer, de bedrijfsbrandweer van Tata Steel en Veiligheidsregio's Utrecht en Haaglanden. Dit onderzoek is enkel mogelijk geweest vanwege de bijdrage in denkkracht en menskracht van hen, en het resultaat dient dan ook gezien te worden als samenwerkingsproduct vanuit het BITET-consortium.

De samenwerking in BITET-verband bij de UHD-beproevingen in 2024 en 2026 smaakt naar meer. Met de BITET-partners denken we alweer na over een volgend praktijkexperiment van een brandweerinzettechniek of -tactiek in het kader van de energietransitie.

Nils Rosmuller
Lector Energie- en transportveiligheid

Inhoud

	Voorwoord	**7**
	Inleiding	**10**
1	**Onderzoeksmethode**	**13**
1.1	Inhoudelijke voorbereiding praktijkexperimenten	13
1.2	Expertsessie UHD-inzettactiek	13
1.3	Praktijkexperimenten met twee elektrische vrachtwagens	14
1.4	Dataverzameling	16
1.5	Analyse van de meetresultaten	17
2	**Systeembeschrijving, theorie en achtergrond**	**18**
2.1	Voertuigcombinaties	18
2.2	Batterijsysteem elektrische vrachtwagen	22
2.3	Thermal runaway	24
2.4	UHD-blussysteem	27
2.5	Elektrische vrachtwagenbrand	27
2.6	Resultaten praktijkexperiment met elektrische personenauto's	29
3	**Experimentele opzet**	**30**
3.1	Initiatie thermal runaway	30
3.2	Testvoertuigen	31
3.3	Meetopstelling	37
3.4	Tijdsverloop	39
3.5	Locatie	40
3.6	Ploegindeling	42
4	**UHD-inzettactiek uit expertsessie**	**43**
4.1	Risicoanalyse	43
4.2	Beheersmaatregelen en aandachtspunten bij de UHD-inzet	44
4.3	Taakverdeling TS-bemanningen en UHD-team	46
4.4	Inzettactiek UHD-team	48
4.5	Inbreng en vrije handelingsruimte van de deelnemende ploegleden	51
4.6	Procedure bij "falen" van de UHD-inzet tijdens de experimenten	52
5	**Meetresultaten eerste experiment**	**53**
5.1	Audiovisuele waarnemingen tijdens het experiment	53
5.2	Temperatuurmetingen in het batterijpakket	61
5.3	Brandonderzoek batterijpakket na afloop van het experiment	66
5.4	Vragenlijsten en groepsinterviews	67
6	**Meetresultaten tweede experiment**	**70**
6.1	Audiovisuele waarnemingen tijdens het experiment	70
6.2	Temperatuurmetingen in het batterijpakket	78
6.3	Brandonderzoek batterijpakket na afloop van het experiment	83
6.4	Vragenlijsten en groepsinterviews	84

7	**Analyse van de meetresultaten**	**87**
7.1	Veiligheid	87
7.2	Effectiviteit	91
7.3	Praktische toepasbaarheid	97
8	**Conclusie**	**100**
9	**Aanbevelingen voor een handelingsperspectief**	**102**
9.1	Herkennen	102
9.2	Verkennen	103
9.3	Stabiliseren (van de werksituatie voor UHD-bediener)	105
9.4	Bestrijden	106
9.5	Nazorg	107
9.6	Stroomschema	107
9.7	Toepassing bij andere typen zwaar elektrisch materieel	109
9.8	Toepassing bij NMC-batterijen	109
	Referenties	**110**
	Bijlage 1 Deelnemers expertsessie UHD-inzettactiek	**112**
	Bijlage 2 Observatieprotocol	**113**
	Bijlage 3 Individuele vragenlijst	**115**
	Bijlage 4 Verklaring deelname praktijkexperiment	**116**
	Bijlage 5 Beeldverslag eerste experiment	**117**
	Bijlage 6 Beeldverslag tweede experiment	**125**
	Bijlage 7 Verslag Brandonderzoek	**135**
	Bijlage 8 Ethische verklaring	**144**
	Bijlage 9 Temperatuurmetingen in het batterijpakket	**154**
	Bijlage 10 Reflectie op beheersmaatregelen en aandachtspunten	**158**

Inleiding

Aanleiding

In 2024 heeft het NIPV in samenwerking met het BITET-consortium onderzoek uitgevoerd naar de veiligheid, effectiviteit en praktische toepasbaarheid van ultrahogedruk snij- en blussystemen (UHD-blussystemen) bij batterijbranden in elektrische personenauto's. Het belangrijkste onderdeel hiervan was een praktijkexperiment met twee volledig elektrische personenauto's (multipurpose vehicles, MPV's), elk voorzien van een lithium-ion batterijpakket van het subtype NMC (nikkel-mangaan-kobaltoxide) met een energie-inhoud van 75 kWh dat volledig was opgeladen (100 % state of charge, SoC) (Hessels & Brans, 2024). De conclusie van dit onderzoek was dat, met in achtneming van een aantal specifieke veiligheidsmaatregelen, het UHD-blussysteem door Nederlandse UHD-eenheden van de brandweer veilig en effectief kan worden ingezet en ook praktisch toepasbaar is.

Hiermee werd de inzet van het UHD-blussysteem als extra inzettactiek geïntroduceerd in de Nederlandse brandweercontext voor de incidentbestrijding van elektrische voertuigbranden waarbij het batterijpakket betrokken is geraakt. Tot dan toe werden er twee inzettactieken gebruikt: het gecontroleerd laten uitbranden van het voertuig of het gebruik van een dompelcontainer. In het laatste geval wordt eerst via een reguliere brandweerinzet met lagedrukstralen de brand van de voertuigcarrosserie bestreden, waarna een dompel-container wordt ingezet voor het doven van de brand in het batterijpakket en ter voorkoming van herontsteking.

Inmiddels zijn elektrische personenauto's (en elektrische bussen) een bekend fenomeen op het Nederlandse wegennet. Elektrisch vrachtverkeer en zwaarder materieel zijn in navolging daarvan ook in opkomst (Elaad NL, 2026). Brand van dit soort grote voertuigen vormt, zeker als ze van (brandbare) lading zijn voorzien, een groter en potentieel complexer incident dan brand in een elektrische personenauto. Het totale brandvermogen is immers aanzienlijk hoger, en ook kunnen meerdere afzonderlijke batterijpakketten met grotere batterijvermo-gens bij de brand betrokken zijn.

Diverse onderzoeken hebben laten zien dat er op dit moment geen handelingsperspectief beschikbaar is voor de incidentbestrijding van batterijbranden in elektrische vrachtwagens of ander zwaar materieel (Arcadis, 2023; DNV, 2022). Beide onderzoeken noemen dit een belangrijk kennishiaat. Hoewel in 2025 door het NIPV, op basis van een bureaustudie, aanbevelingen voor een handelingsperspectief zijn opgesteld voor de bestrijding van branden in elektrische vrachtwagens en zware bouwmachines (Reinders et al., 2025), ontbreekt hierbij nog een bewezen effectieve inzettactiek voor het daadwerkelijk bestrijden van de thermal runaway bij batterijpakketten van zwaar elektrisch materiaal, zoals e-trucks.

Gezien de omvang en het gewicht van deze voertuigen is het gebruik van dompelcontainers om een batterijbrand te beheersen niet praktisch uitvoerbaar; er is momenteel immers geen publiek beschikbare dompelcontainer die groot genoeg is voor een elektrische vrachtwagen. Vanwege de effectiviteit van het UHD-blussysteem bij de branden in het batterijpakket van

personenvoertuigen, lijkt de inzet van dit systeem daardoor ook een mogelijke optie voor branden in elektrische vrachtwagens. Noch binnen Nederland, noch daarbuiten zijn echter testen of incidenten bekend waarbij het UHD-blussysteem bij elektrische vrachtwagen-branden of ander zwaar elektrisch materiaal werd toegepast. Er is op dit moment dan ook geen andere mogelijkheid om een dergelijke brand effectief te bestrijden dan in te zetten op brandbeheersing in plaats van brandbestrijding. Dit betekent deze voertuigen gecontroleerd te laten uitbranden en door (mogelijk langdurige) inzet met lagedrukstralen effecten te beperken en branduitbreiding naar en hinder voor de omgeving te voorkomen.

Doelstelling

Doelstelling van dit onderzoek is vaststellen of een UHD-blussysteem veilig, effectief en praktisch toepasbaar is voor de bestrijding van batterijbranden in elektrische vrachtwagens door de Nederlandse brandweer. Wanneer de resultaten voldoende basis bieden voor het formuleren van een handelingsperspectief, worden tevens aanbevelingen ontwikkeld voor de inrichting van inzetprocedures binnen de Nederlandse brandweerpraktijk. Onder veilig, effectief en praktisch toepasbaar verstaan we:

- Veilig: De brandweermensen kunnen voldoende worden beschermd tegen de effecten van een elektrische vrachtwagenbrand.
- 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 brandweer in Nederland.

Om de doelstelling van dit onderzoek te bereiken, zijn twee full-scale praktijkexperimenten uitgevoerd met twee testvrachtwagens, elk voorzien van twee volledig opgeladen (State of Charge 100%) lithium-ion batterijpakketten van het subtype lithium-ijzer-fosfaat (LFP), en beladen met een brandbare lading bestaande uit zestig houten pallets. In het gekozen scenario zijn eerst de vrachtwagencombinatie en de lading met lagedrukstralen geblust, waarna het UHD-blussysteem is ingezet op de batterijpakketten. De onderzoeksmethode wordt verder toegelicht in hoofdstuk 1.

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 vrachtwagenbrand'.

Veiligheid

1. Hoe kan worden voorkomen dat brandweerpersoneel wordt blootgesteld aan vlammen en fakkels tijdens de UHD-inzet?
2. Hoe kan worden voorkomen dat brandweerpersoneel wordt blootgesteld aan explosies van batterijgassen en drukhouders van de vrachtwagen 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. In hoeverre draagt de inzet van het UHD-blussysteem bij aan het beperken van thermische propagatie en het realiseren van een stabiele en veilige eindsituatie?

Praktische toepasbaarheid

7. Hoe ervaren brandweermensen de UHD-inzet tijdens het experiment, specifiek met betrekking tot veiligheid, moeilijkheidsgraad en fysieke belasting?
8. Hoe beoordelen brandweermensen de functionaliteit van het UHD-blussysteem tijdens de inzet?
9. Hoe ervaren brandweermensen de samenwerking tussen de tankautospuitploeg en het UHD-team tijdens de inzet?

Totstandkoming

Dit experimenteel onderzoek is tot stand gekomen binnen het BITET-consortium. BITET (BrandweerInzetTactieken EnergieTransitie) is een consortium waarin brandweerorganisaties, private partijen en het NIPV samenwerken aan de ontwikkeling, toetsing en validatie van inzettactieken, materieel en tools voor nieuwe ontwikkelingen binnen de energietransitie. De ontwikkelde kennis wordt openbaar beschikbaar gesteld, aangezien effectieve en veilige incidentbestrijding gebaat is bij gezamenlijke kennisontwikkeling en kennisdeling tussen publieke en private partijen.

De consortiumleden hebben gezamenlijk invulling gegeven aan de inhoudelijke voorbereiding, risicoanalyse, operationele planning en veiligheidsorganisatie van de experimenten en hebben een belangrijke rol gespeeld bij de praktische realisatie ervan. Het BITET-consortium bestaat – naast het NIPV – uit:

> Veiligheidsregio Haaglanden (VRH): *T. Payens, R. Turkenburg en R. Tetteroo.*
> Veiligheidsregio Utrecht (VRU): *J. Keyser*
> *P. Moerman en F. van Rijn*
> Gezamenlijke Brandweer (GB): *E. Oudwater en B. Vaes*
> Bedrijfsbrandweer Tata Steel: *A. Rijerse en C. van Amersfoort*

Daarnaast is het onderzoek financieel ondersteund door de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO), Rijkswaterstaat en het Landelijk Expertisecentrum Industriële Veiligheid (LEC IV). TVM Verzekeringen en DAF Trucks hebben testvrachtwagens en batterijpakketten beschikbaar gesteld voor de uitvoering van de experimenten. Het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) heeft metingen verricht om onder meer de emissies tijdens de experimenten te monitoren.

1 Onderzoeksmethode

In dit hoofdstuk wordt de gehanteerde onderzoeksmethode beschreven. Deze bestond uit een voorbereidingsfase, twee full-scale praktijkexperimenten en het analyseren van de resultaten. Hierbij is gebruikgemaakt van zowel kwantitatieve metingen als kwalitatieve gegevens uit observaties en interviews.

1.1 Inhoudelijke voorbereiding praktijkexperimenten

Voor de voorbereiding en het ontwerp van de experimenten is voortgebouwd op de ervaringen uit het BITET-praktijkexperiment met elektrische personenauto's uit 2024. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen aspecten van het onderzoek die, vanwege de specifieke kenmerken van elektrische vrachtwagens, opnieuw moesten worden onderzocht of ontworpen, en aspecten waarvoor bestaande kennis en ervaring uit het eerdere experiment konden worden benut en waar nodig verder verbeterd. Om dit te bepalen is eerst een analyse uitgevoerd van de verschillen tussen elektrische personenauto's en vrachtwagens in onder meer batterijopbouw, voertuigconstructie en inzetcontext bij incidentbestrijding. Op basis hiervan is vastgesteld welke onderdelen nader moesten worden uitgewerkt.

Daarbij is bepaald welke gegevens nodig waren om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden. Vervolgens zijn de opzet van de experimentdagen, de meetprotocollen en de interviewstrategie ontwikkeld. Deze uitwerking vond plaats in overleg met nationale en internationale experts op het gebied van batterijveiligheid, elektrische mobiliteit en incidentbestrijding. Voor de dataverzameling zijn strategieën opgesteld voor visuele observaties, metingen aan het batterijpakket en gestructureerde interviews, gericht op het vastleggen van relevante indicatoren die verder in dit hoofdstuk worden toegelicht. De vragenlijsten en interviewaanpak zijn ontwikkeld in samenwerking met NIPV-onderzoekers met expertise in kwalitatieve onderzoeksmethoden.

Daarnaast zijn in samenwerking met een externe batterijspecialist, die de batterijpakketten voor het experiment heeft geprepareerd, de batterijpakketten geanalyseerd en de initiatie- en monitoringsmethode van de thermal runaway ontworpen. Dit met als doel de preparatie en de wijze van initiatie voor thermal runaway zorgvuldig en veilig uit te voeren, en deze af te stemmen op de specifieke eigenschappen van vrachtwagenbatterijen en de gekozen experimentele opzet. Tot slot hebben wij een ethische reflectie op het onderzoek opgesteld, die is beoordeeld door de ethische commissie van het NIPV en in dit rapport is opgenomen als bijlage 8.

1.2 Expertsessie UHD-inzettactiek

Parallel aan de inhoudelijke voorbereiding van de praktijkexperimenten is een traject ingericht voor de ontwikkeling van de repressieve brandweerinzet. Hiervoor is een expertsessie georganiseerd gericht op het ontwikkelen van een veilige en uitvoerbare

inzettactiek met het UHD-blussysteem op de batterijen van elektrische vrachtwagens. De complexere systeemopbouw van elektrische vrachtwagens, in combinatie met de (wereldwijd) zeer beperkte praktijkervaring met UHD-inzet in deze context en het uitgangspunt om de veiligheid te waarborgen, vormde de aanleiding om de inzetstrategie op deze wijze uit te werken en voor te bereiden. De expertsessie vond plaats bij vrachtwagenfabrikant DAF, waardoor inzicht kon worden verkregen in constructieve kenmerken, batterijconfiguraties en ontwerpgerelateerde risico's van de vrachtwagens, zodat ter plaatse (onderdelen van) elektrische vrachtwagens konden worden bekeken.

Aan de expertsessie namen deel: brandweermensen met (specialistische) ervaring in de inzet van UHD-blussystemen, specialisten op het gebied van elektrische vrachtwagens vanuit DAF, instructeurs van UHD-fabrikant Coldcut Systems en NIPV-onderzoekers (zie bijlage 1). In deze expertgroep zijn technische en operationele risico's en mogelijke scenario's gezamenlijk geanalyseerd. Op basis van een risicoanalyse is een inzettactiek ontwikkeld met bijbehorende veiligheidsmaatregelen. Deze is vertaald naar een handelingsperspectief voor de UHD-inzet op de experimentdagen.

1.3 Praktijkexperimenten met twee elektrische vrachtwagens

Er zijn in deze studie twee praktijkexperimenten uitgevoerd met elektrische vrachtwagens elk voorzien van twee volledig opgeladen (State of Charge 100 %) LFP-batterijpakketten met een energie-inhoud van 100 kWh, waarbij de positionering van de batterijpakketten verschilde.[1] In beide experimenten is gebruikgemaakt van een omgebouwde dieselvrachtwagen, waarvan de motor en dieseltanks zijn verwijderd en waarop in beide gevallen twee batterijpakketten afkomstig van een elektrische vrachtwagen zijn gemonteerd. Elke vrachtwagen is verder beladen met een brandbare lading van 60 houten pallets en geplaatst op een brandweeroefenterrein, waarna thermal runaway is geïnitieerd door mechanische penetratie van het batterijpakket. Na initiatie is de brand gedurende een vooraf bepaalde periode tot ontwikkeling gekomen, waarna eerst de voertuigcarrosserie en lading zijn geblust, en vervolgens het UHD-blussysteem is ingezet op de batterijpakketten die in thermal runaway waren.

De experimenten zijn uitgevoerd onder omstandigheden die representatief zijn voor de Nederlandse brandweerpraktijk, onder andere door rekening te houden met de gemiddelde aanrijtijd van een brandweereenheid en het moment van inzetten. Tijdens de experimenten zijn relevante parameters vastgelegd, waaronder temperatuurontwikkeling en tijd tot stabilisatie. Daarnaast is aandacht besteed aan de veiligheid van de inzetploegen en aan operationele aspecten zoals inzetduur en bereikbaarheid van het batterijpakket.

Voor de beoordeling van de inzet zijn indicatoren opgesteld op het gebied van veiligheid, effectiviteit en praktische toepasbaarheid. De indicatoren worden hieronder toegelicht.

[1] Met twee experimenten kon worden beoordeeld in hoeverre het UHD-blussysteem onder vergelijkbare omstandigheden consistent presteert op een batterijpakket. Daarnaast maakten de verschillende positioneringen het mogelijk om twee relevante inzetscenario's te oefenen en te onderzoeken, waarbij ook inzicht werd verkregen in de mate van brandoverslag die optreedt tussen batterijpakketten, het voertuig en de brandbare lading.

1.3.1 Veiligheid

Voor het veilig toepassen van het UHD-blussysteem bij een elektrische vrachtwagen is het van belang dat brandweermensen die de UHD-inzet verrichten voldoende beschermd zijn tegen de effecten van een brand in de batterij, en daarbij in het bijzonder de effecten van de thermal runaway. In hoofdstuk 4 worden hiervoor verschillende veiligheidsmaatregelen uitgewerkt naar aanleiding van de expertsessie.

Als onderdeel van het experiment is beoordeeld in hoeverre deze maatregelen tijdens het experiment uitvoerbaar en toereikend zijn geweest. Daarvoor is tijdens de brandweerinzet door middel van visuele observaties vastgesteld welke effecten optreden en in hoeverre deze een risico vormen voor de inzetploegen. Hierbij is specifiek gelet op het al dan niet optreden van:

- V1: Fakkels vanuit het batterijpakket en vlamverschijnselen
- V2: Explosies van gassen afkomstig van de thermal runaway in de batterij
- V3: Fysische explosies van drukhoudende voertuigonderdelen, zoals ploffende vrachtwagenbanden
- V4: Het vrijkomen van toxische gassen
- V5: Elektrocutierisico
- V6: Onveilige werkomgeving als gevolg van wegschietende batterijcellen, projectielen en instabiele voertuigonderdelen.

Voor elk van deze effecten is vastgelegd waar ze optreden ten opzichte van de positie van de brandweermensen. Daarbij is beoordeeld of ploegleden zich binnen of buiten het (potentiële) bereik van vlammen, gassen en projectielen bevinden en in hoeverre zij worden beschermd door ingezette middelen, zoals lagedrukstralen. Aanvullend is via vragenlijsten en groepsinterviews vastgesteld hoe brandweermensen hun eigen veiligheid tijdens de inzet hebben ervaren.

1.3.2 Effectiviteit

Voor wat betreft de effectiviteit is onderzocht in hoeverre het UHD-blussysteem op een effectieve wijze kan worden ingezet en of deze inzet leidt tot een substantiële temperatuurdaling in het batterijpakket en daarmee bijdraagt aan het beheersen van thermal runaway. Daarbij is gekeken of een uitvoerbare inzetprocedure mogelijk is waarbij het batterijpakket effectief wordt gekoeld en of thermische propagatie als gevolg van de UHD-inzet wordt beperkt.

De effectiviteit is beoordeeld aan de hand van de volgende indicatoren:

- E1: Het temperatuurverloop binnen de batterij, gemeten met thermokoppels
- E2: De mate van schade aan het batterijpakket na afloop
- E3: Het verloop van de thermische propagatie binnen het batterijpakket en naar volgende batterijpakketten, vastgesteld op basis van het temperatuurverloop (E1) en de schadeanalyse (E2), gedefinieerd als:
  - E3a: cel-cel-propagatie
  - E3b: module-module-propagatie
  - E3c: pakket-pakket-propagatie
- E4: Het kunnen bepalen en bereiken van een geschikte penetratieplek van het UHD-blussysteem als randvoorwaarde voor een effectieve inzet
- E5: Het optreden van stoomvorming bij waterinjectie als indicator voor warmte-onttrekking (koeling) en bepalen van de inzetduur
- E6: Het realiseren van een stabiele eindsituatie.

De temperatuurontwikkeling is gemeten met thermokoppels in het batterijpakket. Daarnaast is tijdens en na de inzet visueel waargenomen of herontsteking optreedt en in hoeverre stoomvorming zichtbaar is als indicator voor warmteonttrekking. Na afloop van het experiment heeft gedurende ten minste 30 minuten monitoring van het batterijpakket plaatsgevonden om de stabiliteit van de situatie te beoordelen. Vervolgens is het batterijpakket geïnspecteerd om de mate van schade en het uitbrandgedrag vast te stellen.

1.3.3 Praktische toepasbaarheid in Nederland

De praktische toepasbaarheid van het UHD-blussysteem is beoordeeld op basis van de ervaringen van de betrokken inzetploegen. Deze informatie is verzameld via individuele vragenlijsten direct na afloop van de inzet en verdiepende groepsinterviews. De vragenlijsten geven inzicht in persoonlijke ervaringen, die tijdens de groepsinterviews gezamenlijk zijn verdiept en geduid. De resultaten tonen de mate waarin de inzet van het UHD-blussysteem niet alleen technisch uitvoerbaar is, maar ook praktisch toepasbaar en werkbaar binnen de Nederlandse brandweerpraktijk. Er is gekeken naar:

- P1: De ervaren veiligheid tijdens de inzet
- P2: De functionaliteit van het UHD-blussysteem binnen de gekozen inzetstrategie
- P3: De samenwerking tussen betrokken eenheden
- P4: De ervaren moeilijkheidsgraad van de inzet
- P5: De ervaren fysieke inspanning tijdens de inzet.

Daarbij is bepaald of een uitvoerbare inzetprocedure mogelijk is. Operationele aspecten, zoals het lokaliseren van hotspots, de bereikbaarheid van penetratieplekken en het bepalen van de inzetduur, zijn geëvalueerd in samenspraak met de aanwezige UHD-experts en UHD-bedieners.

1.4 Dataverzameling

De dataverzameling voor het beoordelen van de in de voorgaande paragraaf beschreven indicatoren bestaat uit visuele waarnemingen, metingen en brandonderzoek aan de batterijpakketten, en het uitzetten van vragenlijsten en afnemen van interviews aan de deelnemende brandweerploegen. De wijze van dataverzameling wordt in deze paragraaf verder toegelicht.

1.4.1 Audiovisuele waarnemingen

Visuele observaties door twee observanten van Team Brandonderzoek vormen een belangrijk onderdeel van de dataverzameling tijdens de experimentdagen, omdat zij inzicht geven in het brandverloop en de daaropvolgende handelingen van de betrokken inzetploegen. Daarbij zijn ook waarnemingen met het gehoor (audio) geregistreerd, zoals het optreden van het geluid van ploffende batterijcellen. Hiervoor zijn observatieformulieren opgesteld met vooraf gedefinieerde criteria, gerelateerd aan de drie centrale pijlers (veiligheid, effectiviteit en praktische toepasbaarheid) van het onderzoek. Met behulp van stopwatches en formulieren zijn tijdstippen en omschrijving van de gebeurtenissen vastgelegd. Deze formulieren zijn gericht op het vastleggen van feitelijke waarnemingen. Daarnaast is gewerkt met twee observatoren om de betrouwbaarheid van de waarnemingen te vergroten. De rol van observator werd hierbij vervuld door twee brandonderzoekers van de Veiligheidsregio Haaglanden en de Veiligheidsregio Utrecht die ervaring hebben met brandonderzoek na afloop van batterijbranden. Voorafgaand aan de praktijkexperimenten

zijn zij geïnstrueerd door de onderzoekers. De gehanteerde criteria voor de observaties zijn opgenomen in Bijlage 2.

1.4.2 Metingen en brandonderzoek batterijpakket

Aan het batterijpakket zijn temperatuurmetingen uitgevoerd en is na afloop brandonderzoek verricht. Voor het bepalen van het temperatuurverloop in het batterijpakket zijn door een externe batterijspecialist thermokoppels geplaatst. Bij de voorbereiding is rekening gehouden met technische randvoorwaarden, zoals hittebestendige bekabeling en voldoende kabellengte, om betrouwbare metingen tijdens de experimenten te waarborgen. Na afloop van de experimenten is het batterijpakket door twee brandonderzoekers en de batterijspecialist onderzocht op schade, uitbrandgedrag en (resterende) spanning op de batterijcellen.

1.4.3 Vragenlijsten en groepsinterviews

De ervaringen van de deelnemende inzetploegen zijn verzameld met behulp van een combinatie van vragenlijsten en groepsinterviews. Hierbij zijn generieke vragenlijsten gebruikt die bestaan uit stellingen op basis van een vijfpuntsschaal (Likertschaal) en individueel door alle deelnemende brandweermensen zijn ingevuld. Hiermee zijn individuele percepties systematisch vastgelegd, zonder directe beïnvloeding door andere deelnemers. De vragenlijsten staan weergegeven in Bijlage 3. Aanvullend is een semigestructureerd groepsinterview gehouden waarin gezamenlijk is gereflecteerd op de inzet. Dit bood de mogelijkheid om ervaringen te verdiepen en te duiden. De nadruk lag hierbij op de praktische toepasbaarheid van het UHD-blussysteem binnen de operationele context. De groepsinterviews zijn uitgevoerd door twee interviewers. Deelname vond plaats op basis van een toestemmingsverklaring, waarin onder andere toestemming voor deelname en de vertrouwelijke verwerking van gegevens waren vastgelegd (Bijlage 4).

1.5 Analyse van de meetresultaten

Tot slot zijn alle meetresultaten van de praktijkexperimenten geanalyseerd aan de hand van de in paragraaf 1.3 genoemde indicatoren voor veiligheid (V1 t/m V6), effectiviteit (E1 t/m E6) en praktische toepasbaarheid (P1 t/m 5). De resultaten uit deze analyse vormen vervolgens de basis voor aanbevelingen voor een handelingsperspectief, waarin onder meer de benodigde veiligheidsmaatregelen worden benoemd.

2 Systeembeschrijving, theorie en achtergrond

In dit hoofdstuk wordt een systeembeschrijving gegeven van een elektrische vrachtwagen en worden de effecten van een thermal runaway toegelicht. Hiermee wordt inzichtelijk waarom de bestrijding van een batterijpakket in thermal runaway bij elektrische vrachtwagens complexer en uitdagender is dan bij elektrische personenauto's. Ten slotte wordt de werking van een UHD-blussysteem uitgelegd.

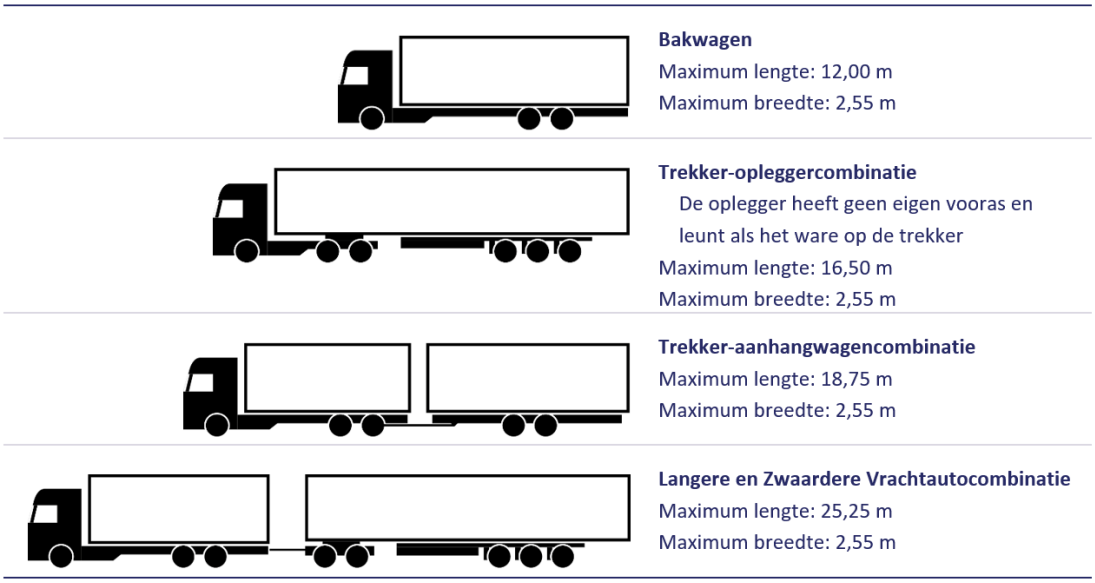
2.1 Voertuigcombinaties

Vrachtwagens bestaan in verschillende voertuigcombinaties. De toegestane combinaties op het Nederlandse wegennet zijn in vier hoofdconfiguraties te verdelen; deze zijn schematisch weergegeven met hun maximale toelaatbare afmetingen in Figuur 2.1 (SWOV, 2020):

- Bakwagen: De chauffeurscabine en laadvloer bevinden zich op één chassis. Dit is een compacte vrachtwagen geschikt voor stedelijke distributie en korte afstanden.
- Trekker-opleggercombinatie: Dit is een combinatie van een trekker (voertuig met een korte chauffeurscabine en geen vaste laadruimte) en een oplegger (de aanhangwagen met de laadruimte). Dit is de meeste voorkomende configuratie en geschikt voor internationaal transport en lange afstanden.
- Trekker-aanhangwagencombinatie (vrachtwagen met aanhangwagen): Dit is een vrachtwagen met een aparte aanhanger die volledig op eigen assen staat. Deze combinatie biedt meer laadcapaciteit, maar is moeilijker te manoeuvreren.
- LZV (ecocombi): Lange Zware Voertuigen zijn combinaties die langer en zwaarder zijn dan standaard vrachtwagencombinaties. Voor het besturen van deze categorie is een speciaal LZV-certificaat nodig en deze combinaties zijn alleen op specifieke wegen toegelaten. Ze zijn daarom alleen geschikt voor specifieke routes.

Daarnaast wordt in Nederland gesproken over de mogelijke toelating van de Super Ecocombi (SEC)[2]; in 2026 lopen hiervoor pilots en een onderzoek naar de toelating.[3] De Super Ecocombi is een vrachtwagencombinatie die nog langer is dan een LZV en bestaat uit een trekker met twee opleggers, verbonden door een dolly. Een Super Ecocombi heeft een maximale lengte van 32 meter.

[2] Brief van de Minister van Infrastructuur en Waterstaat van 19 november 2024, IENW/BSK-2024/311005.
[3] Nieuwsbericht Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat van 20 mei 2026. *Nederlandse Super EcoCombi (SEC) op proef in havengebied Gent.*

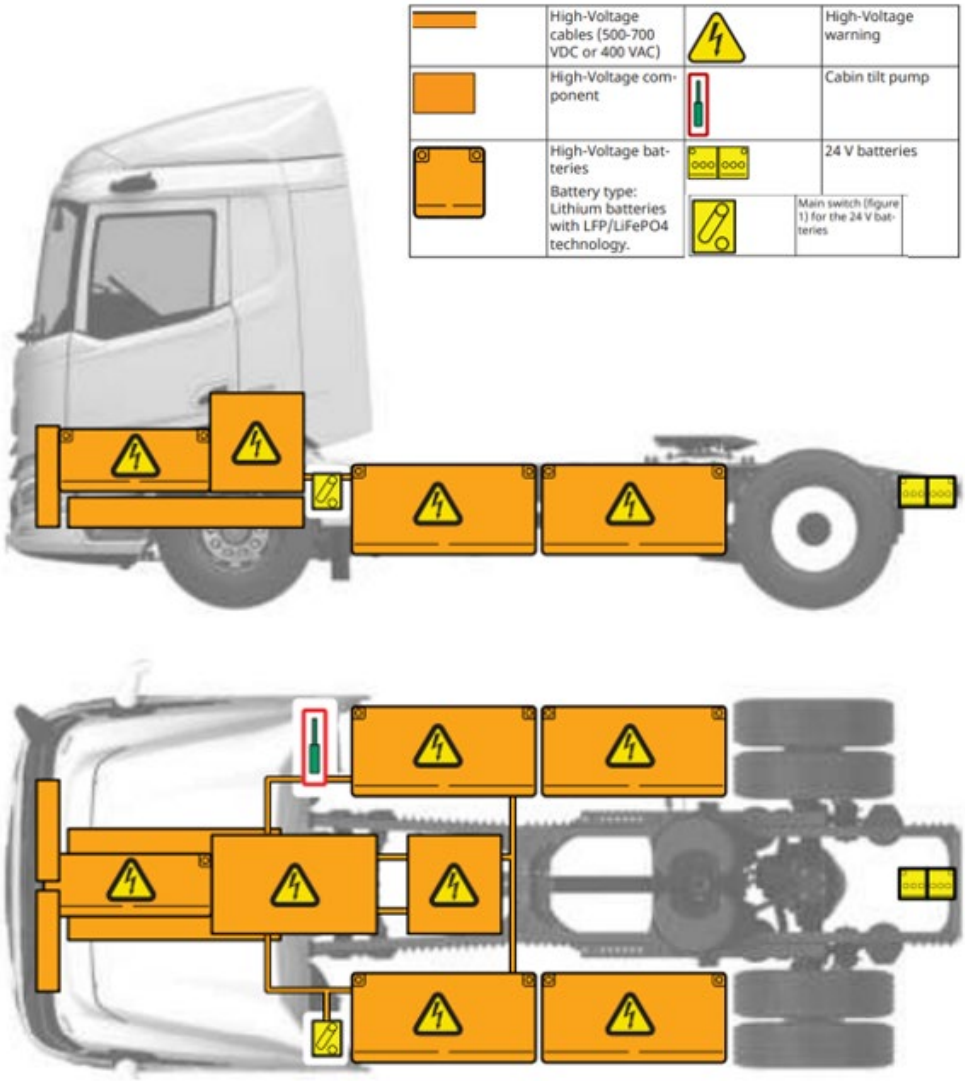


Figuur 2.1 Vrachtwagenconfiguraties (SWOV, 2020)

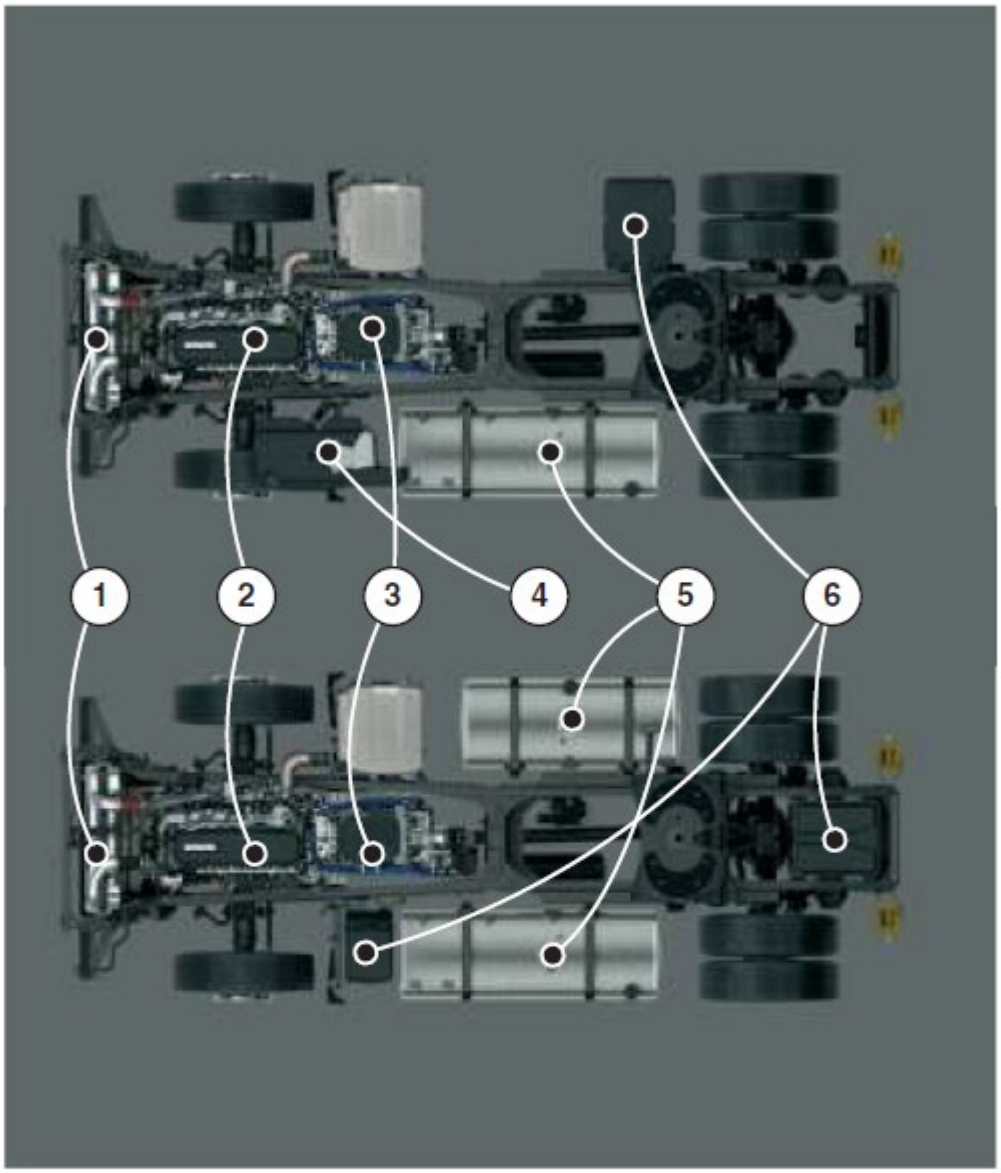
De aanwezigheid van batterijpakketten en een elektromotor in plaats van een brandstoftank en verbrandingsmotor vormt het voornaamste verschil met voertuigen voorzien van een interne verbrandingsmotor. Daarbij kunnen het voertuigchassis van de dieseluitvoering en de elektrische uitvoering van een type vrachtwagen gelijk zijn, zodat alleen de aandrijflijn verschilt. Dit is weergegeven in Figuur 2.2 en Figuur 2.3, waarin respectievelijk de elektrische uitvoering en dieseluitvoering van eenzelfde type vrachtwagen is weergegeven. In Figuur 2.2 is schematisch de plek van de batterijpakketten (high-voltage batteries) weergegeven van een elektrische trekker. In Figuur 2.3 is het onderstel weergegeven van hetzelfde model trekker, maar dan in de dieseluitvoering. Wanneer beide tekeningen worden vergeleken, merken we op dat de batterijpakketten van de elektrische uitvoering aan de zijkant van het voertuigchassis zich vrijwel op dezelfde plek bevinden als de dieseltanks bij de dieseluitvoering.

De capaciteit van het batterijpakket en laadvermogen zullen groter zijn bij zwaardere voertuigen. Bij de plaatsing van de batterijpakketten wordt rekening gehouden met het evenwicht en de stabiliteit van het voertuig en zal getracht worden zoveel mogelijk ruimte voor lading te behouden. De locaties van de pakketten kunnen variëren per fabrikant. Enkele voorbeelden van locaties zijn:

> onder het chassis
> tussen de framebalken
> onder de cabine
> achter de cabine.



Figuur 2.2 Schematische weergave LFP-batterijpakketten van een elektrische vrachtwagen (trekker), zijaanzicht (boven) en bovenaanzicht (beneden) (Emergency Response Guide, 2023a)



1	Coolant: 49 litres
2	Engine oil MX-11 36,5 litres, MX-13 46,0 litres. If retarder fitted 12 litres extra
3	Gearbox oil: between 12 and 20,5 litres
4	AdBlue®: up to 40 or 130 litres
5	Fuel: up to 1500 litres
6	Battery acid

Figuur 2.3 Schematische weergave van het onderstel van een dieseltrekker in een uitvoering met één brandstoftank (boven) en een uitvoering met twee brandstoftanks (onder) (Emergency Response Guide, 2023b)

2.2 Batterijsysteem elektrische vrachtwagen

2.2.1 Lithium-ion batterijen

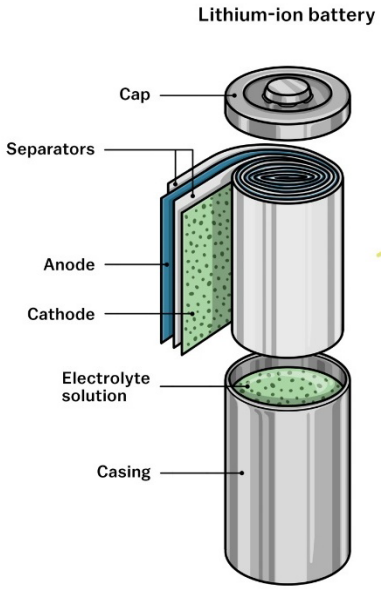
De basiseenheid van een lithium-ion batterij is de batterijcel. Er zijn drie verschillende vormen batterijcellen, namelijk: cilindrische, pouch- en prismatische cellen (Figuur 2.4). Bij cilindrische cellen zit er enige ruimte tussen de batterijcellen, wat de warmteafvoer bevordert. Verder hebben cilindrische cellen een metalen omhulsel dat een hoge druk kan weerstaan (Schröder et al., 2017). Een prismatische cel heeft dit ook, maar de warmteafvoer is lager. De behuizing van een pouchcel bestaat over het algemeen uit een composiet van aluminium en plastic dat minder druk kan weerstaan (Chen et al., 2021).



Figuur 2.4 Prismatische, pouch en cilindrische batterijcel (Huiyao-Laser, 2022)

In Figuur 2.5 is een (cilindervormige) lithium-ion batterijcel in meer detail weergegeven. De drie werkzame componenten van een batterijcel zijn de anode, kathode en de elektrolyt. De anode is verbonden met de minpool en de kathode met de pluspool van de batterij. Daartussenin bevindt zich de elektrolyt. Ter voorkoming van kortsluiting is een separator noodzakelijk tussen de anode en kathode. Voor alle drie de componenten kunnen verschillende materialen worden gekozen, waardoor verschillende subtypen ontstaan (Brans, 2023b). De anode is in de huidige batterijcellen gemaakt van grafiet en de kathode van materiaal dat bestaat uit lithiumverbindingen. Bij NMC-batterijen is de kathode opgebouwd uit lithium, nikkel (N), mangaan (M) en kobaltoxide (C). Bij LFP-batterijen bestaat de kathode uit lithium (L), ijzer (F) en fosfaat (P). De elektrolyt is vloeibaar en brandbaar en bestaat uit een mengsel van lithiumzouten, oplosmiddelen en additieven.

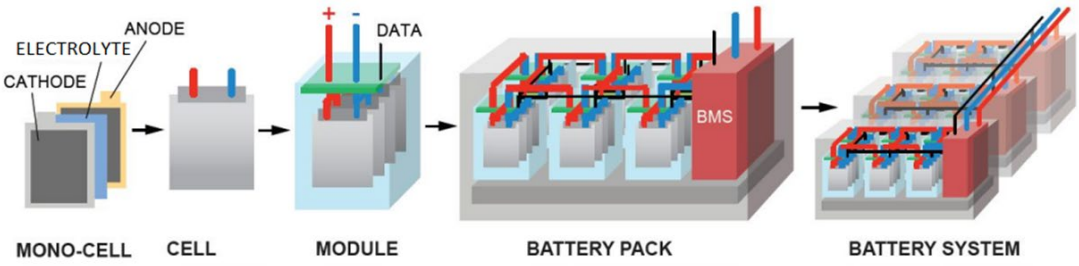
De experimenten zullen worden uitgevoerd met batterijsystemen die gebruikmaken van lithium-ion batterijchemie. Binnen deze categorie worden in de praktijk met name de LFP- en NMC-subtypes toegepast. NMC heeft een wat hogere energiedichtheid. LFP-batterijen hebben een wat hogere thermische stabiliteit en initiatietemperatuur van een thermal runaway. Indien energiedichtheid wat minder van belang is, zoals in stationaire systemen, worden LFP-batterijen dan ook regelmatig toegepast. In de batterijmodules van ons experiment worden prismatische LFP-batterijcellen toegepast.



Figuur 2.5 Inwendige van cilindrische lithium-ion batterijcel (Heilweil & Rodgers, 2022)

2.2.2 Batterijpakket

Met meerdere batterijcellen samen kan een energieopslagsysteem worden opgebouwd. In Figuur 2.6 is schematisch de opbouw van een lithium-ion energieopslagsysteem weergegeven. De batterijcel vormt hierin de basiseenheid. Deze bestaat onder andere uit een anode, kathode en elektrolyt. Meerdere batterijcellen samen vormen een batterijmodule. Deze batterijmodules worden samengevoegd in een batterijpakket.



Source: Alexander Otto, Fraunhofer Institute for Electronic Nano Systems ENAS, presentation of May 30, 2012, "Battery Management Network for Fully Electrical Vehicles Featuring Smart Systems at Cell and Pack Level."

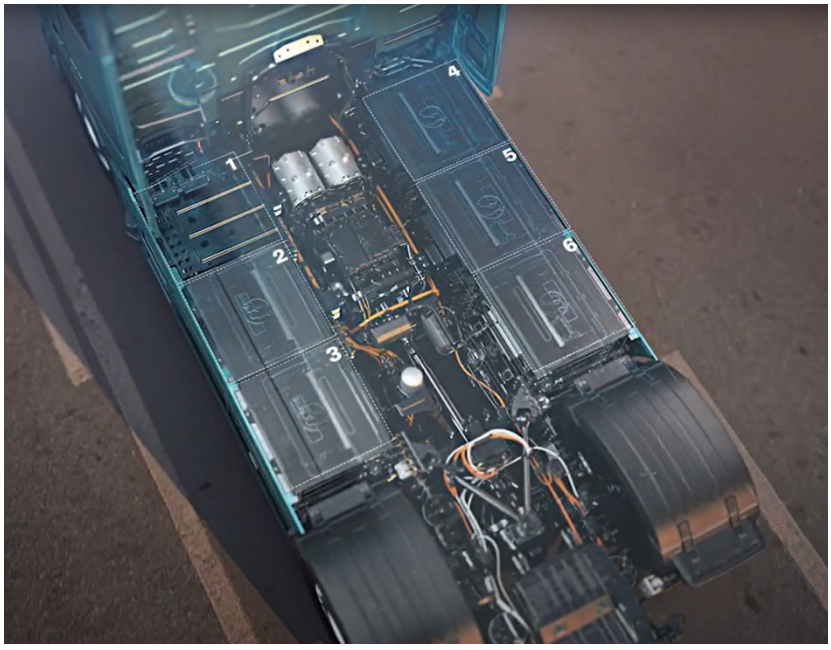
Figuur 2.6 Opbouw van lithium-ion energieopslagsysteem

Een groter batterijsysteem kan uit meerdere batterijpakketten bestaan die aan elkaar zijn gekoppeld. Een batterijsysteem is aangesloten op een Battery Management System (BMS). Het BMS is verantwoordelijk voor het binnen operationele grenzen werken van de batterij en bewaakt dus ook de veiligheid. Door het monitoren van diverse parameters, waaronder spanning, stroom en temperatuur, detecteert het BMS (op moduleniveau) abnormale omstandigheden zoals kortsluiting en oververhitting (Ranjith Kumar et al., 2023). Ook neemt het indien nodig maatregelen, zoals het afschakelen van aangesloten systemen of verlagen van laadstroom.

In Figuur 2.7 een voorbeeld gegeven van een batterijsysteem in een vrachtwagen. Er zijn zes batterijpakketten aanwezig (genummerd 1 t/m 6), elk in dit voorbeeld met een energie-inhoud van 90 kWh. Vergeleken met een personenauto valt het volgende op:

> Elk pakket heeft ruwweg de energie-inhoud van het batterijpakket van een (grote) personenauto.
> Meerdere pakketten kunnen naast of tegen elkaar liggen.
> Pakketten hebben een andere vorm (meer als een kubus, dus dikker ofwel minder plat).

Deze factoren kunnen de UHD-inzet bemoeilijken. Denk hierbij aan brandoverslag naar andere pakketten en (moeilijker) detectie en bereikbaarheid van de ‘hotspot’.



Figuur 2.7 Batterijpakketten in elektrische vrachtwagen (Volvo, 2024)

2.3 Thermal runaway

Zoals gezegd, zijn batterijpakketten opgebouwd uit meerdere modules en bevat elke module meerdere batterijcellen. Wanneer de elektrochemische reacties in de batterij verstoord raken, wordt warmte geproduceerd doordat er ongewenste exotherme reacties beginnen. Indien de geproduceerde warmte niet voldoende kan worden afgevoerd naar de omgeving, zal de temperatuur in de batterijcel oplopen. Als gevolg hiervan zal de reactiesnelheid en dus ook de temperatuur snel toenemen. Oververhitting van een batterij(cel) kan dan een zogeheten thermal runaway in gang zetten, een ongecontroleerde reactie waarbij de temperatuur snel oploopt en er brandbare en toxische gassen worden gevormd. De gevormde gassen zullen de druk in de cel doen oplopen. Wanneer dit in lithium-ion cellen gebeurt, zullen deze uiteindelijk breken (Wang et al., 2019), leidend tot het vrijkomen van de gassen. De mogelijke effecten van een thermal runaway zijn[4]:

> Vrijkomen van toxische gassen
> Batterijbrand (met onverwachte fakkels)
> Explosie (bij vertraagde ontsteking als de brandbare gassen zich ophopen).

De oplopende temperatuur kan ditzelfde proces op gang brengen in naastgelegen cellen, leidend tot een kettingreactie die zich uitbreidt van batterijcel naar batterijmodule naar

[4] Zie ook Brans (2023): Explainer Video Thermal Runaway.

batterijpakket (thermische propagatie), en uiteindelijk tot brand van een heel voertuig. Dit proces kan lang aanhouden (vele uren), waardoor lange tijd blusvoorzieningen aanwezig moeten zijn. Blussen is bovendien lastig, omdat de batterijpakketten goed beschermd zijn tegen externe impacts en waterschade, hetgeen het toedienen van bluswater bemoeilijkt.

De oorzaken als gevolg waarvan een thermal runaway optreedt, kunnen thermisch, elektrisch of mechanisch zijn:

- **Thermisch:** Verhitting van de cel, zoals te zware belasting (bijvoorbeeld te snel laden), of problemen met elektrische verbindingen tussen batterijmodules of -pakketten. Ook externe hittebronnen kunnen verhitting veroorzaken.
- **Elektrisch:** Vorming van metallische structuren (plating, dendrieten) als gevolg van overladen of diep ontladen. Ook gebruik bij lage temperaturen en veroudering van de batterij kunnen deze gevolgen hebben.
- **Mechanisch:** Fysieke beschadigingen als gevolg van bijvoorbeeld botsingen of ruw gebruik van batterijen kunnen tot defecten in de separator leiden. Materiaal- of constructiefouten kunnen uiteraard ook deze gevolgen hebben.

2.3.1 Initiatietemperatuur van thermal runaway

Er kunnen drie karakteristieke temperaturen ($\mathbf{T_1}$,$\mathbf{T_2}$ en $\mathbf{T_3}$) worden onderscheiden in de aanloop naar en tijdens thermal runaway (Feng et al., 2019). $\mathbf{T_1}$ is de temperatuur waarbij een batterijcel door ongewenste exotherme reacties zichzelf verder kan opwarmen (‘self-heating’). Deze zelfverhitting kan bijdragen aan een verdere temperatuurstijging van de cel. $\mathbf{T_2}$ is de initiatietemperatuur (‘trigger temperature’) waarbij de batterijcel daadwerkelijk in thermal runaway raakt. $\mathbf{T_3}$ wordt gedefinieerd als de hoogst experimenteel gemeten temperatuur van de batterijcel. Vlammen of fakkels bij een batterijband kunnen hierbij een maximumtemperatuur hebben variërend van 600 °C tot boven de 1000 °C (Vos et al., 2024).

Door Schröbel et al. (2025) zijn experimenten uitgevoerd met batterijcellen om deze temperaturen experimenteel te bepalen. De gemeten temperaturen zijn weergegeven in Tabel 2.1.

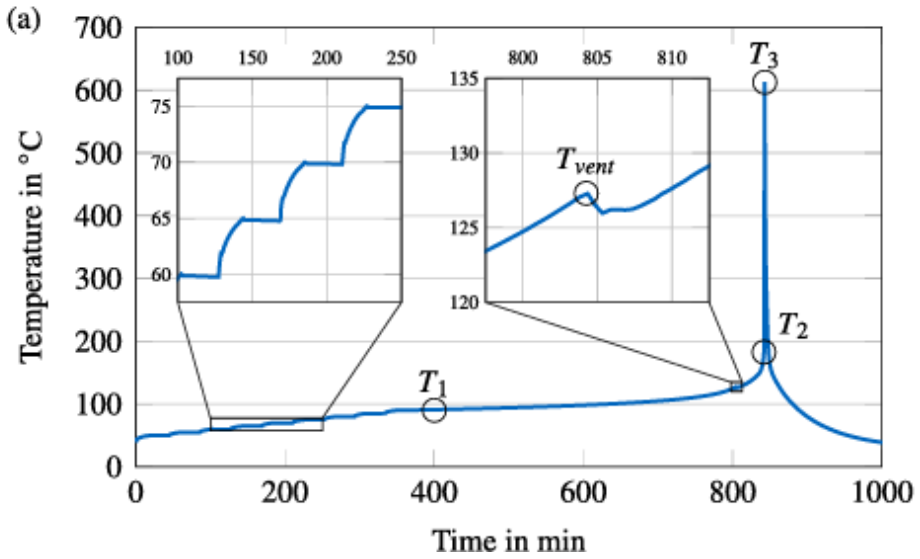
Tabel 2.1 Karakteristieke temperaturen van NMC en LFP batterijcellen bij thermal runaway (Schöberl et al., 2025)

	NMC	LFP
T_1 ***Self-heating*** Cel gaat uit zichzelf opwarmen	96 – 111 °C	152 – 167 °C
T_2 ***Thermal runaway trigger*** Cel raakt in thermal runaway	181 – 186 °C	236 – 257 °C
T_3 ***Maximal cell temperature*** Hoogst gemeten celtemperatuur	305 – 612 °C	305 – 495 °C

Van deze experimenten is in Figuur 2.8 het temperatuurverloop weergegeven van een NMC-batterijcel. Bij dit experiment is de batterijcel gecontroleerd in thermal runaway gebracht door met vaste tussenpozen de temperatuur geleidelijk met stappen van 5 °C te verhogen.[5] De

[5] Aanvullend is in de figuur T_{vent} opgenomen, de temperatuur waarbij de eerste vrijkomende gassen zijn waargenomen.

resultaten laten zien dat tussen T_1 en T_2 een relatief langdurige periode van zelfverhitting aanwezig kan zijn, waarin exotherme reacties warmte blijven produceren zonder dat direct sprake is van thermal runaway. Onder de gecontroleerde omstandigheden van de test duurde deze fase meerdere uren. Dit suggereert dat batterijcellen gedurende langere tijd thermisch actief kunnen blijven wanneer zij zich in het temperatuurgebied van zelfverhitting bevinden.



Figuur 2.8: Temperatuurverloop experiment met 100 % State of Charge NMC-batterijcel (Schöberl et al., 2025)

Tijdens onze experimenten zal de overgang van stoomvorming naar weglekkend water worden gebruikt als een visuele indicator dat lokaal temperaturen rond het kookpunt van water (circa 100 °C) zijn bereikt. Voor de in dit onderzoek toegepaste LFP-batterijen ligt de temperatuur waarbij zelfverhitting kan optreden (T_1) tussen circa 152 en 167 °C. Een temperatuur rond 100 °C ligt daarmee ruim onder deze grens.

Voor NMC-batterijen ligt de temperatuur waarbij zelfverhitting kan optreden in de literatuur doorgaans tussen circa 96 en 111 °C. Hoewel bij een temperatuur van circa 100 °C niet direct thermal runaway wordt verwacht, bevindt deze temperatuur zich nog wel in of nabij het gebied waarin zelfverhitting mogelijk is. Voor NMC-batterijen blijft het daarom wenselijk om door middel van monitoring vast te stellen dat de temperatuur verder afneemt tot duidelijk onder het gebied waarin zelfverhitting kan optreden. Dit wordt ondersteund door ARC-resultaten, waaruit blijkt dat tussen de temperatuur waarbij zelfverhitting aanvangt (T_1) en de temperatuur waarbij thermal runaway initieert (T_2) een langdurige fase van zelfverhitting aanwezig kan zijn, die onder gecontroleerde laboratoriumomstandigheden meerdere uren kan aanhouden. Dit suggereert dat exotherme reacties ook bij afwezigheid van significante externe verhitting nog geruime tijd kunnen voortduren, waardoor een batterijcel thermisch actief kan blijven. Indien de temperatuur daarbij verder oploopt, kan op een later moment alsnog de temperatuur worden bereikt die leidt tot een thermal runaway (Wang et al., 2019).

2.4 UHD-blussysteem

Een ultrahogedruk snij- en blussysteem (UHD-blussysteem) maakt het mogelijk om brandhaarden van buitenaf te benaderen door een gat in een muur of wandscheiding te maken, waarna water onder ultrahogedruk (circa 300 bar) wordt geïnjecteerd. Deze systemen worden al meer dan twintig jaar gebruikt, zijn ontstaan in de offshore-industrie en specifiek bedoeld voor de bestrijding van scheepsbranden. Bij de Nederlandse brandweer zijn er twintig UHD-blussystemen verspreid over tien veiligheidsregio's beschikbaar.

Het systeem werkt door water tot 300 bar onder druk te brengen en een slijpmiddel (abrassief) toe te voegen. Door toevoeging van het slijpmiddel is de waterstraal in staat om door beton of metaal te snijden. Naar wens kunnen additieven aan het bluswater worden toegevoegd. Het debiet van het water van een dergelijk systeem is 60 liter per minuut, en de uittreedsnelheid kan oplopen tot 200 m/s, waardoor het water wordt verneveld. Dit stelt het systeem in staat om snel een groot oppervlak te bereiken en een ruimte effectief te koelen door het onttrekken van warmte door de overgang van water naar stoom.[6]

Met de inzet bij een brand van een batterijpakket hebben UHD-blussystemen een nieuwe toepassing gevonden dan waarvoor ze oorspronkelijk zijn ontworpen. In plaats van een besloten ruimte te koelen met verneveld water, wordt de lans van het UHD-blussysteem ingezet om water in het batterijpakket te injecteren om dit te koelen.

2.5 Elektrische vrachtwagenbrand

Aangezien herontsteking van een batterijpakket een bekend probleem is, kan de situatie zich in theorie voordoen dat, nadat een elektrische voertuigbrand is geblust, het batterijpakket opnieuw in thermal runaway raakt en het voertuig opnieuw vlamvat. Problematisch bij de bestrijding van batterijbranden is dat water van buitenaf amper bij batterijcellen kan komen (Brans, 2023a). Bij personenauto's is het mogelijk om het gehele voertuig gedurende een langere periode in een dompelbak te plaatsen, waardoor het risico van herontsteking kan worden beheerst. Bij een vrachtwagen zal dit in het algemeen niet mogelijk zijn.

Uit onze studie in 2024 is gebleken dat er tussen elektrische en conventionele voertuig-branden van vergelijkbare grootte geen substantieel verschil is ten aanzien van het (piek)brandvermogen of de totale verbrandingsenergie (THR) van de volledige voertuigbrand (Brans & Reinders, 2024). Circa 15 % van de THR bij voertuigbranden van personenauto's is afkomstig van de brandstof of het batterijpakket. Voor vrachtwagens geldt dat (eventuele) brandbare lading al gauw de grootste factor bedraagt in het piekbrandvermogen.

2.5.1 UHD-alarmering casus Duitsland op de A46

Er is één casus uit het buitenland bekend waarbij het UHD-blussysteem in de praktijk is gealarmeerd bij een incident met een elektrische vrachtwagen. Bij dit incident op de snelweg A46 in december 2025 in Duitsland was een elektrisch aangedreven vrachtwagen gekanteld, waarbij één batterijpakket door het ongeval in brand was geraakt (van der Meer, 2025) (Figuur 2.9).

[6] In dit rapport wordt het woord 'stoom' gebruikt zoals in brandweerjargon en spreektaal, waarmee een hete witte nevel wordt bedoeld die bestaat uit kleine *zichtbare* waterdruppeltjes, eventueel vermengd met *onzichtbaar* gasvormig water (stoom in de fysische betekenis van het woord).



Figuur 2.9 Beschadigde batterijpakket van elektrische vrachtwagen en inzet waterwerper bij incident in Duitsland (van der Meer, 2025)

Navraag bij het dienstdoende brandweerkorps uit Duitsland leverde de volgende informatie op over het incidentverloop (M. Böhnke, persoonlijke communicatie, 23 januari 2026). Door de betrokken brandweereenheid werd verteld dat het kunststof batterijomhulsel was opengebarsten en dat er sprake was van een typische fakkel uit het batterijpakket. Nog vóór inzet van het Cobra-systeem werd via een mobiele waterwerper circa 1.400 l/min water direct in het beschadigde batterijomhulsel gebracht, wat een effectief koelende werking had. Zolang de waterwerper actief was, bleef de situatie stabiel; bij onderbreking steeg de temperatuur weer boven de 80 °C.

Omdat er in deze Duitse casus geen rescue sheet van de vrachtwagen beschikbaar was, wilde men het UHD-blussysteem niet inzetten vanwege het risico op beschadiging van intacte batterijmodules. Door de constante koeling via de door het ongeval beschadigde opening kon de thermische propagatie worden beperkt. Na ongeveer vijf uur continu koelen waren geen thermische reacties meer waarneembaar. De batterijmodules werden tijdens het verdere proces, inclusief het weer op zijn wielen zetten van het voertuig, nauwgezet met een warmtebeeldcamera gemonitord. De contactpersoon van het dienstdoende brandweerkorps vermeldde dat hij het UHD-blussysteem als bruikbaar had gezien, indien de benodigde voertuigdata beschikbaar waren geweest. In dit geval bleek de door het ongeval ontstane opening in he batterijpakket voldoende om effectief te koelen en thermal runaway te stoppen en is derhalve geen UHD-inzet gedaan.

Hoewel het UHD-blussysteem wel was gealarmeerd, maar uiteindelijk niet ingezet, blijkt uit het gebruik van de mobiele waterwerper dat het inbrengen van water in het batterijpakket een effectief koelende werking had. Daarbij dient opgemerkt te worden dat dit in deze specifieke casus mogelijk was, omdat de behuizing van het batterijpakket beschadigd was en door de ontstane opening water ingebracht kon worden.

2.6 Resultaten praktijkexperiment met elektrische personenauto's

Uit het eerder door het NIPV uitgevoerde experiment met personenauto's (Hessels & Brans, 2024) bleek dat een UHD-blussysteem veilig, effectief en praktisch toepasbaar door gespecialiseerde UHD-eenheden in Nederland kan worden ingezet voor de bestrijding van een instabiel dan wel brandend batterijpakket van een elektrisch voertuig, mits de volgende veiligheidsvoorwaarden worden getroffen:

- Inzetten van lagedrukstralen (1) ter onderdrukking van eventuele fakkels uit het batterijpakket, en (2) ter afscherming van de UHD-bediener tegen blootstelling aan die (onverwachte) fakkels.
- Vaststellen dat zich geen brandbare gassen hebben opgehoopt in of rondom het voertuig. Het kapot spuiten van de ramen met het UHD-blussysteem, eventueel ondersteund door het gebruik van ventilatoren, kan helpen om brandbare gassen te ventileren. Hierbij dient ruim voldoende afstand te worden gehouden totdat alle brandbare gassen zijn verdreven, omdat het mogelijk is dat bij het openbreken van de ruiten alsnog een explosie ontstaat.
- Positionering van de UHD-bediener (en ander brandweerpersoneel) zoveel mogelijk buiten de (toxische) rook en vlammen.
- Gebruik van de lange lans of het verlengstuk van het UHD-blussysteem.

Tijdens het experiment met personenauto's is gebleken dat een effectieve inzetprocedure mogelijk is waarmee het batterijpakket kan worden gekoeld en de thermische propagatie in het batterijpakket kan worden gestopt. De inzetprocedure bestaat uit het identificeren van hotspots met een warmtebeeldcamera en vervolgens het 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 stoomvorming naar weglekkend water geeft aan dat de inzet kan worden beëindigd. Hierna is een periode van monitoring (visueel en met een warmtebeeldcamera) noodzakelijk om er zeker van te zijn dat de situatie is gestabiliseerd en er geen herontsteking of temperatuur-toename plaatsvindt. Het deelnemende brandweerpersoneel heeft aangegeven de UHD-inzet als positief te hebben ervaren en dat deze relatief gemakkelijk was uit te voeren, waarmee is gebleken dat het UHD-blussysteem in principe praktisch toepasbaar was.

3 Experimentele opzet

3.1 Initiatie thermal runaway

Bij het NIPV-praktijkexperiment in 2024 met elektrische personenvoertuigen is mechanische beschadiging in de vorm van penetratie met een kolomboormachine gebruikt als initiatiemethode voor thermal runaway (Hessels & Brans, 2024). Aangezien deze initiatiemethode succesvol is gebleken, had deze ook de voorkeur voor dit experiment. De kolomboormachine kon op afstand worden bediend en was in beide gevallen succesvol. Ze was door middel van een spanklem tussen de vloer en het dak van de personenauto bevestigd en was in samenwerking met een veiligheidsregio ontworpen. De thermal runaway kon met deze opstelling op veilige afstand worden geïnitieerd, doordat het trekken aan een touw de kolomboormachine liet zakken, zodat het batterijpakket van bovenaf werd doorboord.

Gezien de systeemopbouw van een elektrische vrachtwagen anders is, was eenzelfde opstelling moeilijk te realiseren. Daarom is in overleg met een batterijspecialist een andere uitvoering van mechanische penetratie voorbereid. De voor het experiment gebruikte batterijpakketten zijn daartoe geprepareerd. Uiteindelijk is gekozen voor een initiatiemethode met lange schroeven, die op afstand met een boormachine met verlengstuk in het batterijpakket vanaf de zijkant konden worden gedraaid. Hierbij is een klein gat in de buitenste behuizing van het batterijpakket geprepareerd, dat werd voorzien van een metalen sluitring om te voorkomen dat de schroef bij impact kon terugslaan. Per batterijpakket zijn acht openingen voorbereid, zodat meerdere penetratiepogingen mogelijk zouden zijn.

In aanvulling daarop is het batterijpakket voorverwarmd tot in eerste instantie 60 °C. Bij deze keuze speelde mee dat de ter beschikking gestelde batterijpakketten van het subtype LFP (lithium-ijzer-fosfaat) waren. In vergelijking met het subtype NMC (nikkel-mangaan-kobaltoxide), ligt de initiatietemperatuur van thermal runaway bij LFP hoger en komt er bij de thermal runaway minder hitte vrij (Ohneseit et al., 2023), zie ook tabel 2.1. Onder meer het verschil in deze twee eigenschappen maakt dat thermische propagatie bij LFP-batterijen langzamer verloopt (Schöberl et al., 2025). Bij bepaalde praktijktesten is thermische propagatie van module naar module ook uitgebleven (P. Christensen, persoonlijke communicatie, 24 september 2025; W. Verbakel, persoonlijke communicatie, 8 oktober 2025). Juist omdat bij LFP-batterijen thermische propagatie minder gemakkelijk optreedt dan bij NMC-batterijen, is gekozen voor voorverwarming van de batterijpakketten.

Mocht thermal runaway en thermische propagatie bij de eerste poging niet slagen, dan bleef met deze experimentele opzet verdere voorverwarming mogelijk of het indraaien van een volgende schroef. Om te onderzoeken of de inzet van het UHD-blussysteem in staat is om de thermische propagatie in de batterij te beperken, is het logischerwijs noodzakelijk dat thermische propagatie optreedt.

3.2 Testvoertuigen

3.2.1 Voertuigcombinatie

Via verzekeraar TVM zijn twee testvrachtwagens beschikbaar gekomen (Figuur 3.1 en Figuur 3.2). Het betreffen twee omgebouwde dieselbakwagens, die elk door ons zijn voorzien van twee originele vrachtwagenbatterijpakketten van 100 kWh per stuk. Vanwege de beperkte beschikbaarheid van nieuwe elektrische vrachtwagens en de daar bijbehorende relatief hoge kosten was het niet mogelijk om nieuwe, volledig elektrische vrachtwagens voor dit experiment te verkrijgen. Daarom is gekozen voor een configuratie waarbij de voertuig-carrosserie van een dieselvrachtwagen is gecombineerd met losse batterijpakketten afkomstig uit elektrische vrachtwagens.

Bij het prepareren van de testvoertuigen is gestreefd naar een zo representatief mogelijke configuratie. De batterijpakketten zijn onder het chassis geplaatst, op een positie die overeenkomt met die in volledig elektrische vrachtwagens. Dit sluit aan bij de huidige praktijk, waarin het chassis van diesel- en elektrische varianten vaak grotendeels overeenkomt (B. de Ridder, persoonlijke communicatie, oktober 2025; H. Veldhoven, persoonlijke communicatie, 21 januari 2026). Het gebruik van meerdere batterijpakketten is bovendien kenmerkend voor elektrische vrachtwagens. Hoewel in dit experiment per voertuig twee batterijpakketten zijn toegepast (in plaats van bijvoorbeeld vijf in serie-modellen), wordt hiermee wel een representatief deel van de systeemopbouw nagebootst, omdat door de aanwezigheid van twee batterijpakketten ook onderzocht kan worden in hoeverre de brand overslaat op naastliggende en tegenoverliggende batterijpakketten en ook welke invloed de aanwezigheid van meerdere batterijpakketten heeft op de brandweerinzet.

Tot slot is gekozen voor de aanwezigheid van een beperkte hoeveelheid brandbare lading in de vorm van 60 houten pallets, met een brandlast equivalent aan 1380 kg vurenhout (zie paragraaf 3.2). Deze keuze is gemaakt, omdat de brandbare lading een grote bijdrage levert aan het totale brandvermogen van vrachtwagenbranden en daarmee bepalend is voor de realistische waarde van het experimentele scenario. Uit onze eerdere studie blijkt dat de brandbare lading vaak de bepalende factor is in de ontwikkeling en omvang van voertuigbranden (Brans & Reinders, 2024). Op deze manier wordt een realistische en tegelijkertijd beheersbare praktijksituatie nagebootst.



Figuur 3.1 Testvrachtwagen eerste experiment (chauffeurszijde)



Figuur 3.2 Testvrachtwagen tweede experiment (chauffeurszijde)

3.2.2 Preparaties aan de testvrachtwagen

Omwille van de veiligheid tijdens het experiment zijn een aantal voorzorgsmaatregelen genomen:

- Drukhoudende voertuigonderdelen zijn drukloos gemaakt of verwijderd om het risico op exploderende voertuigonderdelen weg te nemen (denk aan het leeg laten lopen van de banden en het verwijderen van gasveren).
- De vrachtwagens zijn geplaatst op tegels, zodat ze niet zouden kunnen wegrollen.
- De batterijpakketten zijn zodanig gepositioneerd, dat ze met een verreiker in geval van nood verwijderd zouden kunnen worden, en daarna eventueel gedompeld.[7]

3.2.3 Batterijpakketten

Voor het praktijkexperiment zijn vier originele elektrische vrachtwagenbatterijpakketten door een vrachtwagenleverancier ter beschikking gesteld, zodat elke testvrachtwagen over twee batterijpakketten beschikte. Een schematische weergave en foto van een batterijpakket zijn weergegeven in Figuur 3.3. Elk batterijpakket had een capaciteit (energie-inhoud) van 100 kWh en was van het subtype LFP (lithium-ijzer-fosfaat). De capaciteit was verdeeld over drie batterijmodules, die boven elkaar door middel van een metalen frame in de buitenste behuizing van het batterijpakket waren gemonteerd, zoals te zien in Figuur 3.4. Elke batterijmodule bestond weer uit prismatische batterijcellen, zie Figuur 3.5. Daaromheen zat een verwarmingselement gemonteerd dat normaliter is bedoeld om bij koude temperaturen het batterijpakket voor te verwarmen. Dit verwarmingselement was zo geprepareerd, dat het op maximaal vermogen kon worden gebruikt om het batterijpakket verder op te warmen tot maximaal 60 graden Celsius om thermische propagatie te bevorderen.

De batterijpakketten zijn in samenwerking met een batterijspecialist geprepareerd voor een initiatie van de thermal runaway met lange schroeven, een vonkengenerator (bougie) om directe ontsteking van brandbare gassen te bevorderen en het plaatsen van thermokoppels (verder toegelicht in paragraaf 3.3). De batterijpakketten zijn voor het experiment volledig opgeladen tot 100 % State of Charge, omdat bij deze State of Charge de maximale energie

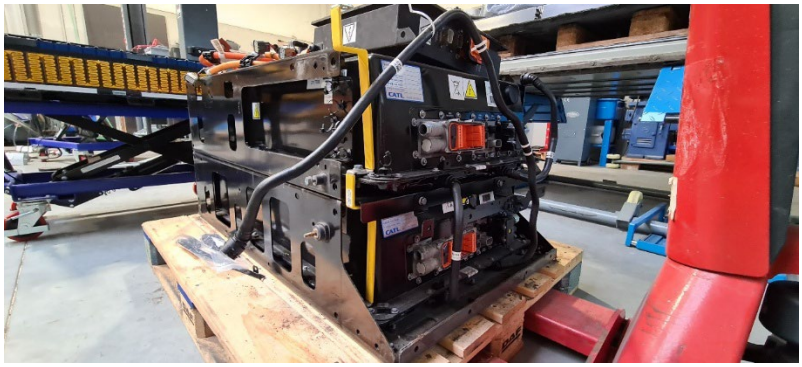
[7] In de systeembeschrijving is vermeld dat er geen publiek beschikbare dompelcontainer bestaat voor elektrische vrachtwagens. In het geval van het experiment zou het gaan om enkel het dompelen van de batterijpakketten. Omdat deze los onder de vrachtwagen stonden was dit in een noodsituatie wel mogelijk geweest, in tegenstelling tot een echt incident waarbij de batterijpakketten gemonteerd zijn aan het voertuigchassis.

in het batterijpakket aanwezig is en daarmee de meeste hitte vrijkomt bij een thermal runaway.

Van LFP-batterijen is bekend dat er, in vergelijking met nikkel-mangaan-kobaltoxide (NMC)-batterijen, vaker sprake kan zijn van een vertraagde ontsteking van de vrijkomende brandbare gassen (Bugryniec et al., 2024; RIVM, 2025; van Harn & Brans, 2024) en (P. Christensen, persoonlijke communicatie, 24 september 2025). Uit voorzorg is daarom een additionele ontstekingsmethode in de vorm van een vonkengenerator toegepast om directe ontsteking van brandbare gassen te bevorderen.



Figuur 3.3 Batterijpakket: links schematische weergave (bron: DAF) en rechts een foto van de buitenkant)



Figuur 3.4 Twee van de drie batterijmodules in opstelling (bovenste module niet op de foto). Op deze foto is te zien hoe de batterijmodules in de behuizing van het batterijpakket in Figuur 3.3. zitten gemonteerd.



Figuur 3.5 Open batterijmodule, deksel verwijderd



Figuur 3.6 Geprepareerd batterijpakket met initiatieschroeven (in totaal acht aan de voorzijde met metalen steunplaten, waarvan de onderste vier zijn omcirkeld) en oranje kabels van thermokoppels

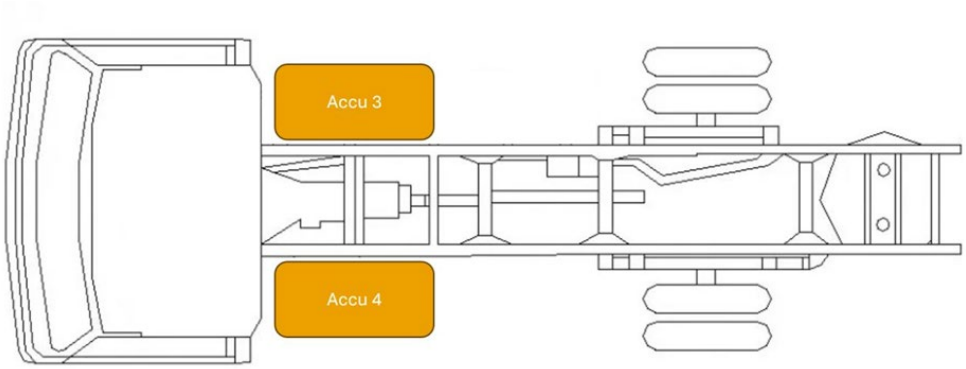
3.2.4 Positionering van de batterijpakketten

In Figuur 3.7 en Figuur 3.8 is weergegeven hoe de batterijpakketten in de twee testvrachtwagens respectievelijk tijdens het eerste en tweede experiment zijn gepositioneerd. Bij het eerste experiment is één batterijpakket aan de bestuurderszijde geplaatst en een tweede batterijpakket aan de bijrijderszijde. Bij het tweede experiment zijn twee batterijpakketten naast elkaar aan de bestuurderszijde geplaatst.[8]

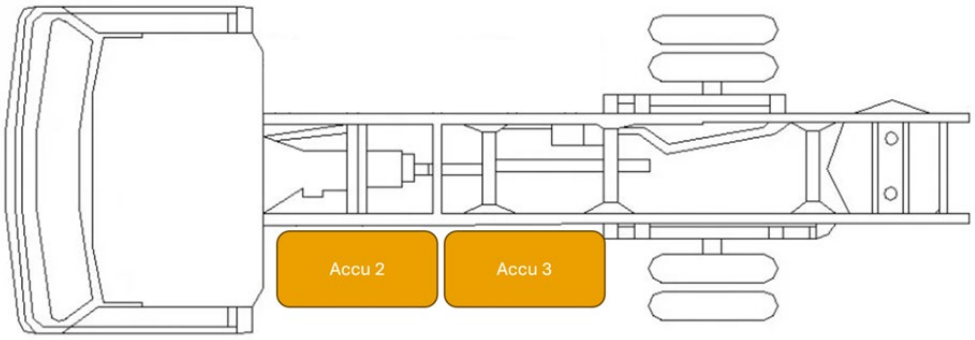
Met deze keuze voor de positionering van de batterijpakketten zijn bij benadering twee mogelijke scenario's experimenteel getest voor wat betreft thermische propagatie van batterijpakket naar batterijpakket (zie ook Figuur 3.9). Op de eerste dag zou er thermische propagatie mogelijk naar een verder gelegen batterijpakket aan de overkant en op de tweede dag propagatie naar het meest naastgelegen batterijpakket. De positionering van

[8] In de figuren is te zien dat batterijpakket 3 (accu 3) zowel in het eerste als het tweede experiment is gebruikt. Er waren vier batterijpakketten beschikbaar voor dit experiment; de keuze voor een eventueel hergebruik van batterijpakket 3 hing af van de mate van beschadiging. Tijdens het eerste experiment is batterijpakket echter 3 niet aantoonbaar beschadigd geraakt, waardoor het hergebruikt kon worden.

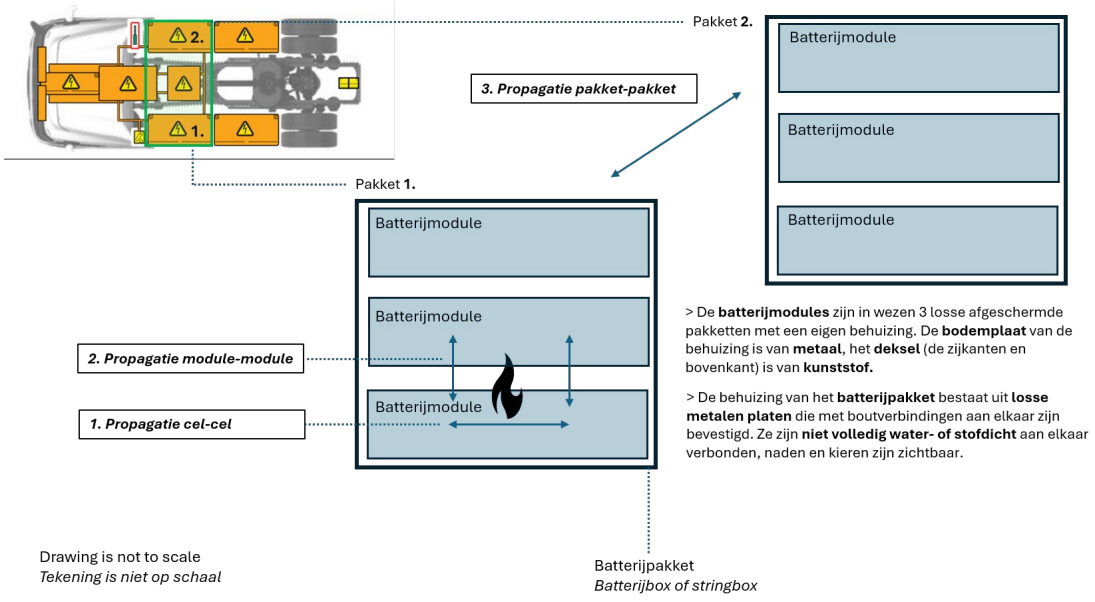
een batterijpakket in het midden van het voertuig (gedeeltelijk onder de cabine) is niet experimenteel getest.
Voor de experimenten was het nodig om een brandscenario te creëren waarbij thermische propagatie zou optreden. Hierbij was propagatie denkbaar op drie niveaus, namelijk (1) tussen de individuele cellen (cel-cel-propagatie), (2) tussen de batterijmodules binnen een batterijpakket (module-module-propagatie) en (3) tussen de afzonderlijke batterijpakketten van de elektrische vrachtwagen (pakket-pakket-propagatie).



Figuur 3.7 Positionering van de batterijpakketten eerste experiment



Figuur 3.8 Positionering van de batterijpakketten tweede experiment



Figuur 3.9 Toelichting niveaus van thermische propagatie

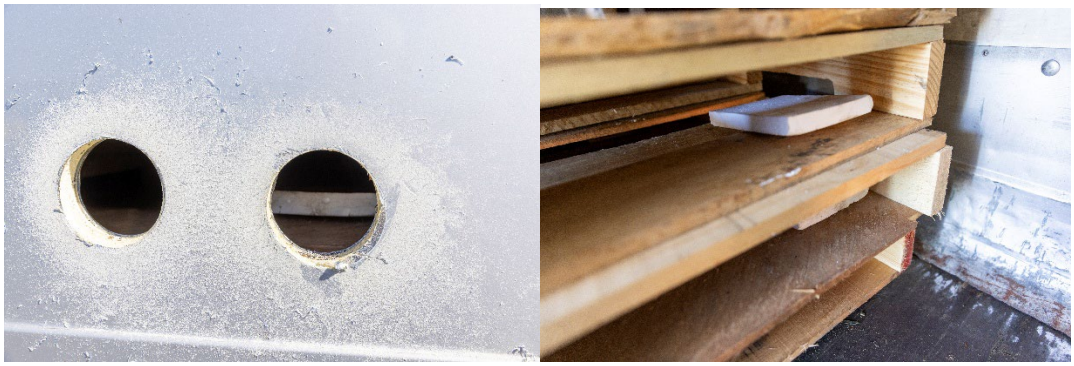
3.2.5 Aanwezigheid van brandbare lading

Op basis van effectberekeningen (zie het blauwe kader onder de abbeeldingen) is vooraf een passend ladingsvolume vastgesteld bij het beoogde onderzoeksdoel; hieruit is een lading van 60 pallets per vrachtwagen gekomen. Dit is weergegeven in Figuur 3.10. Bovendien gaf de aanwezigheid van enige lading ook inzicht in de mogelijke uitbreiding van brand van batterijpakket naar batterijpakket. Dit was relevant, omdat de aanwezigheid van meerdere afzonderlijke batterijpakketten een kenmerkend aspect is van zware elektrische voertuigen ten opzichte van elektrische personenauto's.

Er is er gekozen om de brandbare lading alleen boven de batterijen aan te brengen, om zo te onderzoeken of er branduitbreiding tussen de batterijen zou plaatsvinden via de lading. Er waren ook aanmaakblokjes geplaatst aan de onderzijde van de houten pallets, die bereikbaar waren vanuit geboorde gaten in de wanden van de vrachtwagen, zodat ze konden fungeren als een voorziening voor handmatige ontsteking (Figuur 3.11).



Figuur 3.10 Lading in de testvrachtwagens



Figuur 3.11 Voorziening voor handmatige ontsteking

Effectberekening houten pallets

Met behulp van de rekenmethode in Brans & Reinders (2024) is het aantal pallets vastgesteld dat moest fungeren als brandbare lading. In praktijkexperimenten gevonden in de literatuur zijn volledige vrachtwagenbranden met lading uitgevoerd; hierbij was sprake van een brandbare lading tussen de 3,1 en 10,9 ton (Lönnermark & Ingason, 2004). De lading in deze tests bestond uit houten pallets en verschillende brandbare goederen. Een lineaire regressieanalyse van deze data leverde de volgende

formule op voor een indicatie van het piekbrandvermogen, waarbij 25 MW het brandvermogen van de lege voertuigcombinatie is.

$$pHRR = 15{,}3\ M + 25$$

Hierbij is M de massa van de brandbare lading (houten pallets) in ton, en 15,3 de indicatie voor de pHRR in MW/ton en 25 MW een waarde die door Rijkswaterstaat is gegeven voor een lege vrachtwagen. 60 pallets met een massa van 1,380 ton geven aldus een pHRR van 46,1 MW. Als maximumbrandvermogen van een elektrische vrachtwagen wordt door ons aangehouden 150 MW na tien minuten brandontwikkeling. Deze piekwaarde volgt uit de testen van Lönnermark & Ingason (2004). Hiermee zitten we op circa 30 % van deze piekwaarde; dit wordt als redelijk beschouwd voor een realistische, beperkte lading.

3.3 Meetopstelling

Voor de experimenten waren vier batterijpakketten beschikbaar (B1 t/m B4). Het was noodzakelijk om minimaal twee batterijpakketten per voertuigtest te gebruiken, omdat de aanwezigheid van meerdere batterijpakketten nabij elkaar een kenmerkend aspect is voor elektrische vrachtwagens. In Figuur 3.7 en Figuur 3.8 is de positionering van de batterijpakketten weergegeven, en in Figuur 3.12 en Figuur 3.13 wordt getoond hoe de thermokoppels waren gemonteerd in het eerste en het tweede experiment.

De figuren tonen een schematische weergave van de meetopstelling rondom twee batterijpakketten, aangeduid als **B3** (rechterzijde) en **B4** (linkerzijde) *of* **B2** (linksonder) en **B3** (linksachter).[9] De batterijpakketten zijn weergegeven als een rechthoekig vlak, die uit drie lagen modules bestaat. Hierbij is de onderste module genummerd als M1, de middelste module als M2 en de bovenste module als M3. In de figuren is hiervan de onderste module weergegeven, die bestaat uit drie rijen met prismatische batterijcellen. Binnen elk batterijpakket zijn op elke module twee of vier thermokoppels geplaatst.

In de onderste module (M1):

- **V1 en V2** (aan de voorkant van het pakket)
- **A1 en A2** (aan de achterkant van het pakket).

In de middelste en bovenste module (M2 en M3):

- **V** (aan de voorkant van het pakket)
- **A** (aan de achterkant van het pakket).

Hierbij zijn telkens in de onderste modules van de batterijpakketten vier thermokoppels V1, V2, A1 en A2 aangebracht. Bij de middelste en bovenste modules (M2 en M3) zijn twee thermokoppels per module aangebracht, namelijk V en A, waarbij de positie V op V1 is en A op A2. Hiervoor is gekozen, omdat er maximaal acht signalen per datalogger beschikbaar waren en zodoende acht per batterijpakket, vier in de onderste module, twee in de middelste en twee in de bovenste. Aangezien telkens in de onderste module thermal runaway is geïnitieerd, is ervoor gekozen om in deze module vier thermokoppels te plaatsen.

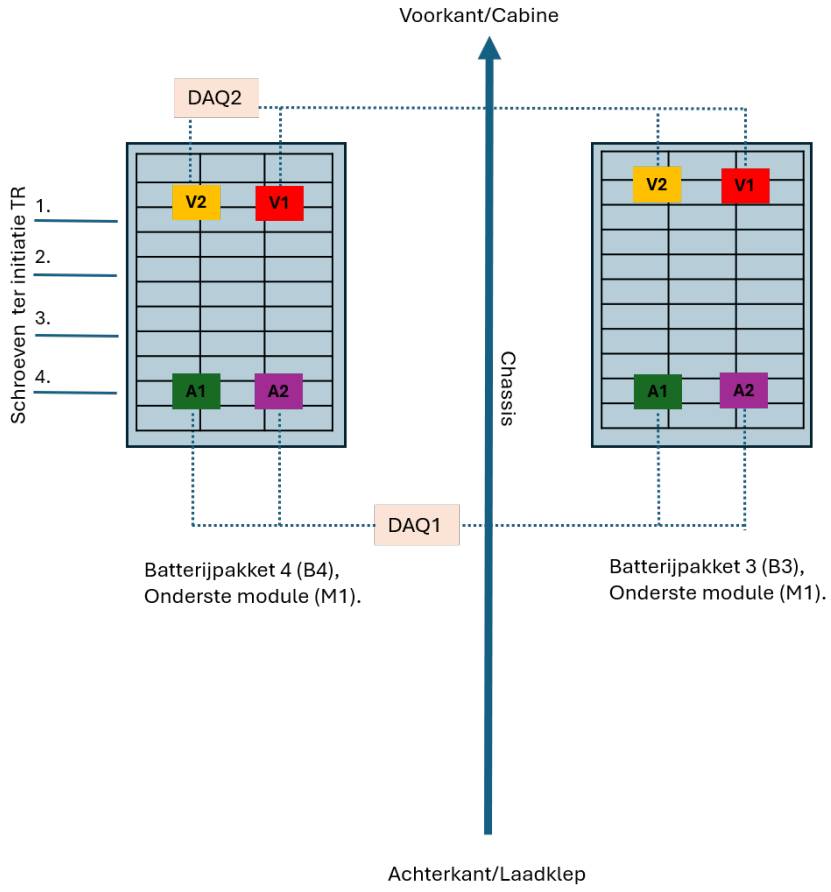
[9] Batterijpakket 3 is zowel bij het eerste als het tweede experiment gebruikt.

De thermokoppels hebben de temperatuur gemeten in de tijd op verschillende posities binnen het batterijpakket, zodat zowel verticale als horizontale variaties konden worden vastgesteld. De sensoren waren aangesloten op twee dataloggers (DAQ-systemen):

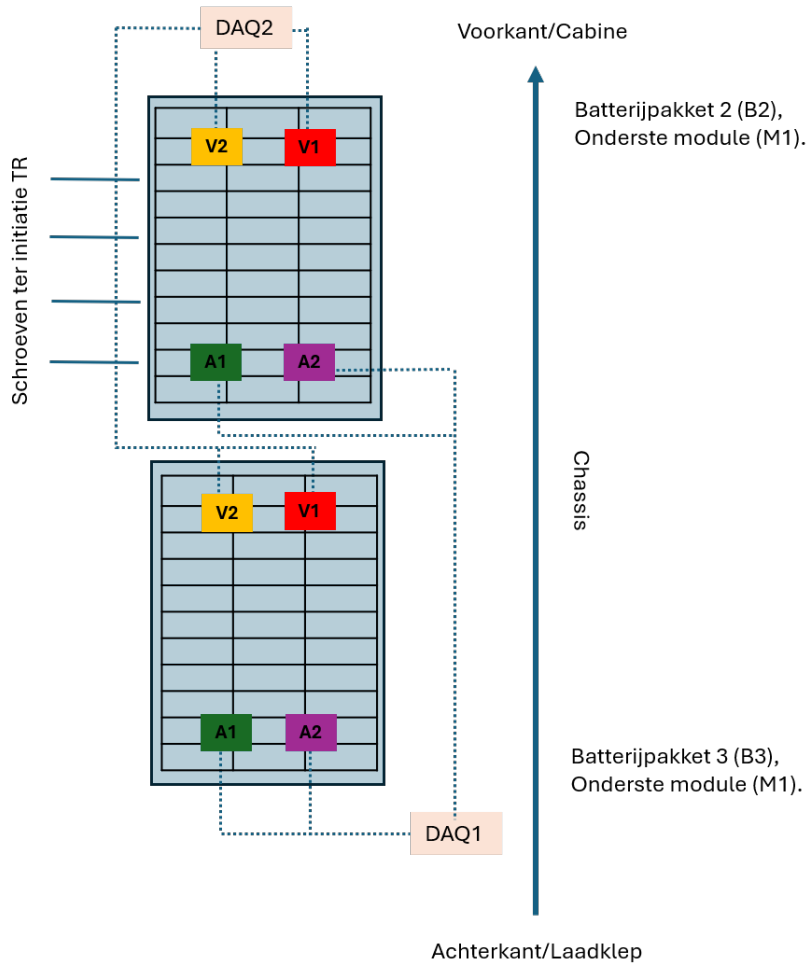
> **DAQ1** was verbonden met de onderste meetpunten (A1 en A2)
> **DAQ2** was verbonden met de bovenste meetpunten (V1 en V2).

De stippellijnen geven de bekabeling weer tussen de thermokoppels en de dataloggers. Tussen de twee batterijpakketten is een pijl weergegeven die de oriëntatie van de meetopstelling (rijrichting) aangeeft. Deze meetconfiguratie maakte het mogelijk om de temperatuur in elke module van elk batterijpakket te monitoren. De zekerheid dat daadwerkelijk metingen zouden worden uitgevoerd, was geborgd door redundantie: elke datalogger (DAQ) was aangesloten op een separate personal computer, zodat bij uitval van één systeem meetdata (gedeeltelijke) beschikbaar zouden blijven.

Tot slot zijn in de figuren 3.12 en 3.13 de initiatieschroeven voor thermal runaway weergegeven. In de onderste module (M1) waren vier schroeven (1 t/m 4) geprepareerd;, en in de middelste module (M2) en bovenste module (M3) elk twee schroeven (schroef 5 en 6) en (schroef 7 en 8). Schroef 5 en 6 bevinden zich op de plek van schroef 1 en 2, maar dan in de middelste module. Schroef 7 en 8 bevinden zich op de plek van schroef 1 en 2, maar dan in de bovenste module.



Figuur 3.12 Bovenaanzicht meetopstelling met thermokoppels (V1, V2, A1 en A2) eerste experiment.



Figuur 3.13 Bovenaanzicht meetopstelling thermokoppels (V1, V2, A1 en A2) tweede experiment.

3.4 Tijdsverloop

De brand is gestart door het door middel van schroeven mechanisch initiëren van een thermal runaway in een van de batterijen van de vrachtwagen. Vervolgens kreeg de brand 10 minuten ontwikkeltijd, overeenkomstig met de opkomsttijd van een tankautospuit in Nederland. De verwachting was dat in deze tijd de brand zou zijn overgeslagen van de batterijen op zowel de cabine van het voertuig, als op de lading. Na deze 10 minuten ontwikkeltijd is de eerste tankautospuit ter plaatste gestuurd. Deze is, conform de reguliere werkwijze bij een ‘vrachtwagenbrand’, na 5 minuten bijgestaan door een tweede tankautospuit en een Officier van Dienst. Deze namen de brandbestrijding van het voertuig en de lading op zich.

Toen zij constateerden dat de batterijen bij de brand betrokken waren, is de UHD-eenheid opgeroepen. Deze had een opkomsttijd van 10 minuten na alarmering. Nadat deze eenheid ter plaatse was gekomen, heeft ze een UHD-inzet uitgevoerd. Als deze UHD-inzet “succesvol” was, werd het experiment beëindigd.[10]

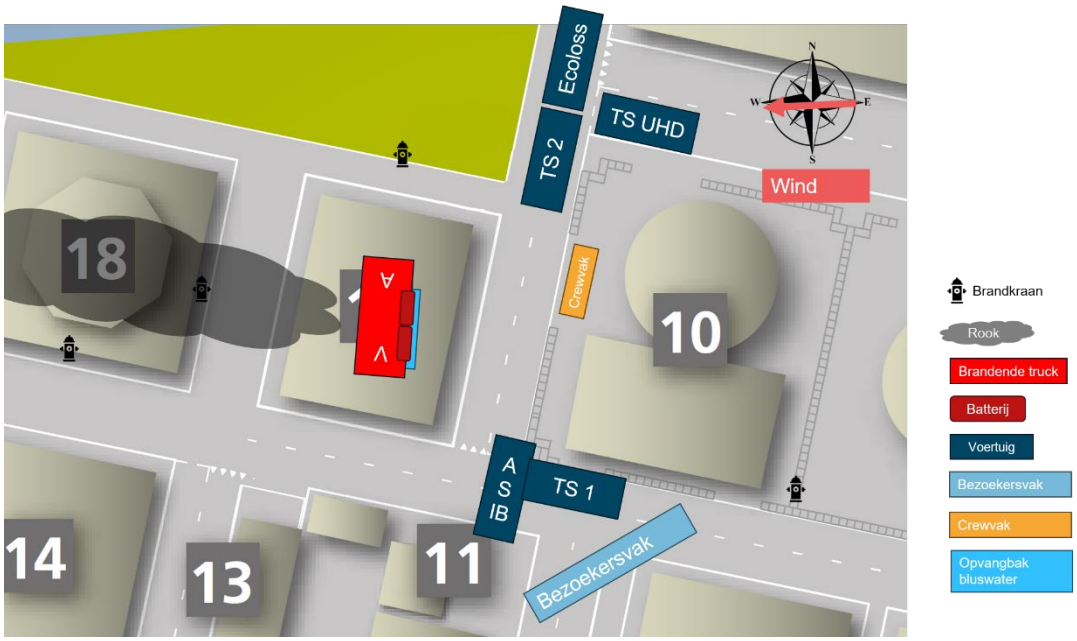
[10] In geval van falen van de UHD-inzet en als de batterijbrand niet ter plaatste gestabiliseerd kon worden, kon gekozen worden door de projectleider om de batterij onder te dompelen of de batterij gecontroleerd te laten uitbranden op een

Nadat de uitgebrande elektrische vrachtwagen was vrijgegeven door de projectleider, werd het batterijpakket gedemonteerd om het te kunnen inspecteren. Hierbij werden voltage-metingen verricht en fotomateriaal gemaakt. Na afloop van elke testdag zijn de uitgebrande vrachtwagenonderdelen en het batterijpakket op een verantwoorde wijze afgevoerd. Dit gold ook voor het mogelijk vervuilde bluswater.

3.5 Locatie

3.5.1 Plattegrond

De experimenten zijn uitgevoerd op het Oefencentrum RelyOn Nutec op de Maasvlakte. Daarbij is gebruikgemaakt van een specifiek ingerichte brandweeroefenplaats. In Figuur 3.14 is de plattegrond van het terrein weergegeven, waarin de verschillende locaties die tijdens de experimenten zijn gebruikt, staan aangegeven. Het terrein is ingericht op basis van de op de experimentdagen aanwezige windrichting, zodanig dat het crew- en bezoekersvak bovenwinds waren gepositioneerd.



Figuur 3.14 Plattegrond van de oefenplaats tijdens het experiment

3.5.2 Waterwinning en waterafvoer

Op het terrein zijn twee typen waterwinning aanwezig: het hydrantennet en het drinkwaternet. Voor wat betreft de voertuig- en ladingblussing is gebruik gemaakt van het aanwezige hydrantennet, dat bestaat uit een gesloten bluswatersysteem waarbij bluswater van oefeningen wordt hergebruikt. De tankautospuiten werden aangesloten op de industriële autospuit van de Gezamenlijke Brandweer. De UHD-eenheden maakten gebruik van het drinkwaternet, om mogelijke vervuiling van het UHD-blussysteem te voorkomen. Daarnaast is op het terrein een bluswateropvang aanwezig, waar het bluswater dat vrijkwam bij de

daartoe geëigende plek. Daartoe was een dompelcontainer aanwezig. Als onderdompelen of uit laten branden niet mogelijk zou zijn, maar een interventie wel nodig, zou een industriële autospuit van de Gezamenlijke Brandweer worden ingezet om de brand onder controle te krijgen (en te houden) en rookgassen neer te slaan.

bestrijding van de branden in de cabine en de lading werd opgevangen via het aanwezige bluswaterriool.

Het water dat werd gebruikt voor UHD-blussing mocht echter niet in het bluswaterriool terechtkomen. Om dit te voorkomen, is een metalen opvangbak met een inhoud van circa 800 liter onder de vrachtwagen geplaatst, waarin de batterijen werden gezet. Na afloop van de reguliere blussing van de voertuig en lading werd de UHD-blussing voorbereid. Op dat moment werd de zuigleiding van de vacuümwagen[11] aangesloten, die ervoor zorgde dat het vervuilde bluswater afkomstig van de UHD-blussing werd weggezogen uit de opvangbak. Het vacuümwagenbedrijf zorgde vervolgens voor de verdere milieuverantwoorde verwerking daarvan op de voorgeschreven wijze.

3.5.3 Omgevingseffecten

De omgevingseffecten van de gassen van de thermal runaway, oftewel verspreiding van de gassen buiten het terrein, zijn zoveel mogelijk beperkt. Hiertoe zijn drie maatregelen genomen, waarbij uiteindelijk enkel de primaire maatregel is uitgevoerd.

- Primaire maatregel: de ontsnappende toxische gassen zijn zo veel mogelijk worden verbrand door ze in een vroeg stadium aan te steken.
- Secundaire maatregel: het gebruik van waterschermen om de rookgassen neer te slaan. Deze zijn vooraf opgebouwd en gereed gemaakt. Ze zijn benedenwinds opgesteld voor het geval de toxische gassen niet zouden ontbranden en zich horizontaal verspreiden
- Noodmaatregel: Het stand-by hebben van een industriële autospuit om bij escalatie het gehele testobject met de vrijkomende gassen die niet ontbranden in een waternevel of spray te omhullen, waarmee verspreiding van de toxische gassen wordt beperkt.

3.5.4 Veiligheidsvoorschriften op locatie

Tijdens de uitvoering van de experimenten golden vastgestelde veiligheidsvoorschriften. Zo was een veiligheidsfunctionaris aanwezig, herkenbaar aan een oranje veiligheidshesje met de tekst ‘veiligheidsfunctionaris’; diens aanwijzingen dienden te allen tijde te worden opgevolgd. Daarnaast hield een veiligheidsfunctionaris vanuit RelyOn, herkenbaar aan een rode helm, toezicht op de naleving van locatiespecifieke afspraken.

Voor alle bij de repressie betrokkenen waren vooraf de geldende veiligheidsinstructies conform de veiligheidskaart van RelyOn beschikbaar gesteld. Het gebruik van persoonlijke beschermingsmiddelen was verplicht: het brandweerpersoneel diende een helm te dragen en kleding te sluiten; tijdens de inzet waren handschoenen en gesloten nekflappen verplicht. Tevens was het dragen van ademlucht verplicht bij het betreden van het met witte lijnen afgebakende oefengebied (zie figuur 3.14 en 3.15) en het benedenwinds gebied buiten deze afbakening.

Indien nodig kon door de projectleider, de veiligheidsfunctionaris van RelyOn Nutec of een deelnemer een time-out worden afgekondigd, waarbij de oefening tijdelijk werd stilgelegd voor afstemming of instructie; hervatting vond plaats op aanwijzing van de instructeur. In geval van een ‘no-play’ situatie (einde oefening), bijvoorbeeld bij een incident met deelnemers of staf, zouden niet-betrokken personen door de veiligheidsfunctionaris van

[11] Een vacuümwagen is een voertuig uitgerust met een vacuümpomp en opslagtank waarmee vloeistoffen, slib en verontreinigd bluswater kunnen worden opgezogen en afgevoerd.

RelyOn naar de verzamelplaats worden begeleid. Voor deze situatie gold een aangepaste procedure, waarbij deelnemende eenheden niet direct werden ontruimd, redden prioriteit had boven blussen, de minst betrokken eenheid optrad als reddende eenheid, en de Officier van Dienst samen met de veiligheidsfunctionaris de inzet coördineerde. Indien mogelijk zou de blussing voortgezet worden om ongewenste effecten van het brandende object te beperken. Bij het afgaan van het ontruimingsalarm zouden de experimenten direct gestaakt worden en alle aanwezigen zich onder begeleiding naar de verzamelplaats begeven. Afhankelijk van de windrichting kon een alternatieve verzamelplaats worden aangewezen. Dit alles is echter niet nodig geweest.

3.6 Ploegindeling

Voorafgaand aan beide praktijkexperimenten is een ploegindeling gemaakt (Tabel 3.1). De deelnemende brandweerploeg bestond uit een Officier van Dienst (OvD), twee tankautospuiten (TS 1 en TS 2) met elk zes brandweermensen en een UHD-ploeg (UHD) bestaande uit eveneens zes brandweermensen. In totaal waren er zodoende negentien brandweermensen betrokken bij de brandweerinzet. Verder zijn UHD-blussystemen van twee fabrikanten gebruikt, namelijk de Cobra van Cold Cut Systems bij het eerste experiment en de Cooflre van Coolfire Systems bij het tweede experiment.

Tabel 3.1 Ploegindeling

Eenheid	Brandweerkorps eerste experiment	Brandweerkorps tweede experiment	Voertuignummer	Bemensing
Officier van Dienst (OvD)	Veiligheidsregio Utrecht (VRU)	Veiligheidsregio Utrecht (VRU)	100	100 (Officier van Dienst)
Eerste Tankautospuit (TS 1)	Bedrijfsbrandweer Tata Steel	Brandweer Schiphol	110	110 (Bevelvoerder) 119 (Chauffeur) 111 112 113 114
Tweede Tankautospuit (TS 2)	Veiligheidsregio Utrecht (VRU)	Veiligheidsregio Haaglanden (VRH)	120	120 (Bevelvoerder) 129 (Chauffeur) 121 122 123 124
UHD-ploeg (UHD)	Gezamenlijke Brandweer (GB) met Cobra UHD-blussysteem	Veiligheidsregio Haaglanden (VRH) met Coolfire UHD-blussysteem	130	130 (Bevelvoerder) 139 (Chauffeur) 131 (UHD-bediener) 132 133 134

4 UHD-inzettactiek uit expertsessie

Auteurs, namens het BITET-consortium:
T. Payens, R. Turkenburg en R. Tetteroo (VRH), en B. Vaes en E. Oudwater (GB)

In dit hoofdstuk worden de uitkomsten beschreven van de expertsessie die was georganiseerd door het BITET-consortium. Met deze expertsessie is de UHD-inzettactiek voorbereid in een samenwerking tussen experts met repressieve ervaring en het UHD-blussysteem, instructeurs van een UHD-blussysteemfabrikant, de leverancier van de vrachtwagenbatterijpakketten en de leden van het BITET.

4.1 Risicoanalyse

Als startpunt is begonnen met het identificeren van alle mogelijke gevaren die tijdens een elektrische vrachtwagenbrand kunnen optreden, en tijdens het benaderen daarvan met een UHD-blussysteem. Hierbij zijn dertien risico's geïdentificeerd die kunnen optreden tijdens de inzet van het UHD-blussysteem specifiek op elektrische vrachtwagenbatterijpakketten. Hieronder vallen ook omstandigheden die de UHD-inzet lastiger of niet uitvoerbaar maken. Ze staan hieronder weergegeven.

1. Blootstelling aan **fakkels (steekvlammen) uit de batterij**.
2. **Warmtestraling en hitte van de brand:** blootstelling aan warmtestraling en hoge temperaturen met risico op brandwonden door het verbranden van brandbare materialen of accudelen, inclusief dermatologische blootstelling aan heet materiaal in gas-, spray- of vloeibare vorm.
3. **Explosierisico in batterijpakket:** ophoping van brandbare gassen in batterijmodules of het gehele batterijpakket kan leiden tot explosies, met risico op blootstelling aan vlammen, hitte, drukgolven en rondvliegend puin.
4. **Explosierisico in cabine of laadruimte:** ophoping van brandbare gassen in de cabine of laadruimte kan explosies veroorzaken, met risico op vlammen, hitte en drukgolven richting personeel.
5. **Fysische explosies van voertuigonderdelen:** risico op blootstelling aan hitte, drukgolven en rondvliegend puin door fysieke explosies van banden, velgen, luchtveren, airbags, remsystemen of andere onderdelen die worden aangestraald door brand of fakkels.
6. **Toxische blootstelling** van huid en/of luchtwegen aan giftige of bijtende stoffen in gas-, aerosol-, spray- of vloeibare vorm, inclusief het risico op contact met verontreinigd bluswater bij de UHD-inzet wanneer de lansbediener dicht bij de bron of op de knieën (laag bij de grond en dus het water) moet werken.
7. **Ecologische risico's** Lekkage van giftige stoffen en andere chemicaliën in bodem, grondwater of lucht.
8. **Elektrische schok** vanuit het accupakket of de laadinrichting.

9. **Onveilige werkomgeving:** beperkte mogelijkheden om afstand te nemen en een moeilijke bereikbaarheid van het batterijpakket.
10. **Meerdere gelijktijdige gebeurtenissen die verband houden met thermal runaway:** dergelijke gebeurtenissen in verschillende batterijstrings kunnen het overzicht zodanig verstoren, dat een veilige inzet moeilijk wordt.
11. **Hotspots zijn niet te lokaliseren:** hotspots in het batterijpakket zijn moeilijk te bepalen door de meerdere lagen rond het pakket, waardoor cellen in thermal runaway lastig te lokaliseren zijn wanneer deze zich in middelste of achterste rij batterijcellen van de betreffende module bevinden.
12. **Falen van de UHD-inzet:** bij onvoldoende effectieve UHD-inzet kan thermische propagatie doorgaan, met risico op voortdurende uitstroom van gassen of steekvlammen door aanhoudende hitte en gebrekkige koeling. Bovendien kan smelten of verbranden van de behuizing ertoe leiden dat de batterij niet langer onder water kan worden gehouden in de eigen behuizing.
13. **Fysische explosie door stoomuitzetting in batterijpakket:** door overdruk door stoom-vorming kunnen de batterijmodule of het batterijpakket exploderen.

4.2 Beheersmaatregelen en aandachtspunten bij de UHD-inzet

Nadat deze risico's waren geïdentificeerd, zijn tijdens de expertsessie beheersmaatregelen uitgewerkt bij elk van de risico's om zo het risiconiveau te minimaliseren. Deze maatregelen staan in tabel 4.1 per risico uitgewerkt. Met inachtneming van deze maatregelen wordt de UHD-inzet tijdens het praktijkexperiment voorbereid en uitgevoerd. In hoofdstuk 7 wordt gereflecteerd op maatregelen die tijdens de praktijkexperimenten zijn toegepast. In Bijlage 10 wordt gereflecteerd op alle in tabel 4.1 genoemde beheersmaatregelen en aandachtspunten.

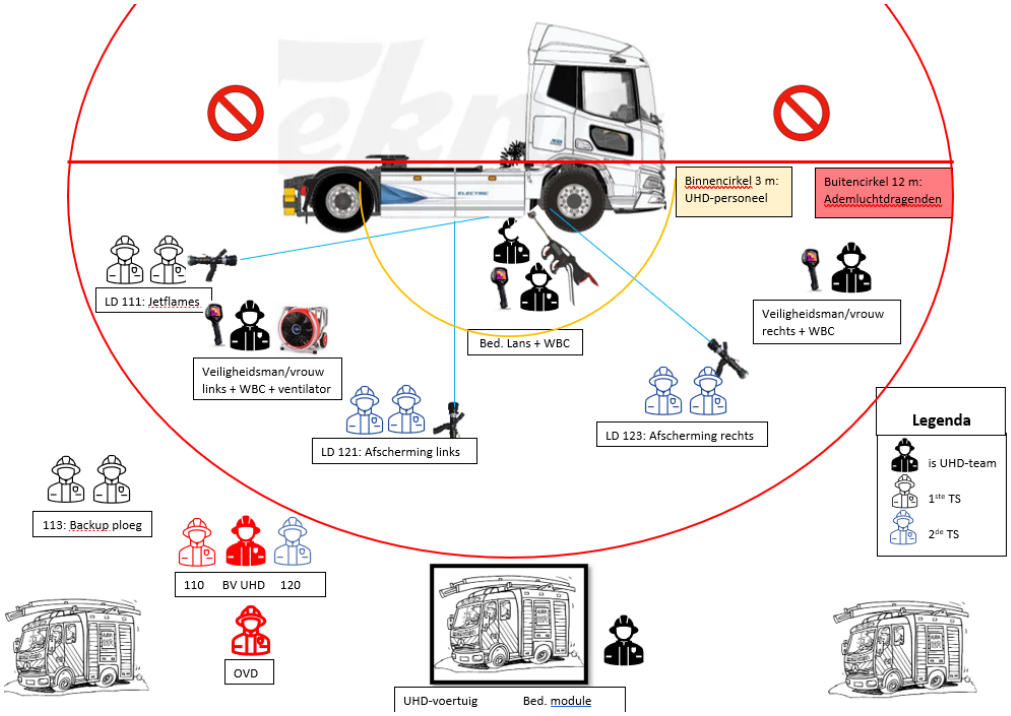
Tabel 4.1 Risico's en mitigerende maatregelen

Risico	Beheersmaatregelen en aandachtspunten
1. Fakkels uit de batterij	a. Informeer en observeer waar tijdens de reguliere blussing steekvlammen zijn waargenomen om de ventilatieopeningen te lokaliseren. b. Inzet van lagedrukstraal (LD) tussen vrachtwagen en lansbediener. c. Voorkom zo veel mogelijk dat de lansbediener voor de opening in het accupakket staat tijdens de UHD-inzet (90 graden op het pakket).
2. Warmtestraling en hitte van de brand	a. Draag de standaard PBM voor brand. b. Zorg ervoor dat de blootstellingstijd zo kort mogelijk is. c. Voorkom contact met hete onderdelen. d. Op afstand kan blussing uitgevoerd worden als handstralen niet mogelijk zijn door warmtestralingscontouren.
3. Ophoping van brandbare gassen in de batterijmodule of het batterijpakket	a. Tijdens de test zullen zowel in als buiten het batterijpakket de gassen ontstoken worden om explosiegevaar zoveel mogelijk te voorkomen. b. Bij grote uitstroom, flinke steekvlammen, etc. terugtrekken tot de situatie weer als veilig wordt beschouwd.

Risico		Beheersmaatregelen en aandachtspunten
		c. Inzet lagedrukstraal tussen vrachtwagen en lansbediener bij eventuele ontsteking. d. Gebruik van ventilatoren om gassen weg te blazen.
4.	Ophoping van explosieve gassen in cabine of laadruim	a. Bij grote uitstroom en/of flinke steekvlammen terugtrekken. b. Bij de test zullen zowel in als buiten het batterijpakket de gassen ontstoken worden om explosiegevaar zoveel mogelijk te voorkomen. c. Als de gassen niet ontbranden: maak gebruik van natuurlijke ventilatie, de overdrukventilator of het UHD-blussysteem om het gas weg te krijgen.
5.	Fysische explosie van voertuigonderdelen	a. Tijdens de testen zijn de banden drukloos en worden waar nodig gekoeld met een lagedrukstraal. b. Tijdens de testen zijn zo veel mogelijk drukhouders verwijderd of er is inzichtelijk gemaakt waar ze zitten. c. Continu monitoren op opwarming van deze onderdelen en indien nodig koelen met een lagedrukstraal.
6.	Toxische blootstelling	a. Draag de standaard PBM voor brand inclusief ademlucht. Bij voorkeur droog. Werk indien mogelijk bovenwinds. b. Maak gebruik van de overdrukventilator. c. Overweeg het advies van een AGS. d. Volg de juiste stappen (zie procedure) voor ontsmetting (arbeidshygiëne). e. Zorg ervoor dat de blootstellingstijd zo kort mogelijk is. f. Gebruikmaken van barrière, pallet of anderszins door lansbediener, zodat deze niet continu in (vervuild) bluswater zit met de knieën.
7.	Ecologische risico's	a. Beperk, na het afblussen van het voertuig, de hoeveelheid water om het accupakket te koelen. b. Beperk vervuiling van bodem en oppervlaktewater door bijvoorbeeld het dichten van putten voor het (hemelwater)riool. c. Tijdens de test wordt het water opgevangen.
8.	Elektrische schok	a. Zorg dat de lansbediener geen contact maakt met de metalen onderdelen van het UHD-blussysteem. b. Bij normaal gebruik wordt de UHD-bediener niet blootgesteld aan elektrische spanning, vanwege het zwevend net en de elektrisch geïsoleerde behuizing van de handgrepen van het UHD-blussysteem. c. Koppel het voertuig veilig los van de laadpaal. d. Schakel het laadstation af.
9.	Onveilige werkomgeving	a. Geen inzet als er geen veilige werkplek gecreëerd kan worden. b. Bekijk het CRS van tevoren om risico's in kaart te brengen en te beoordelen of de werkplek veilig is. c. Defensief optreden, mogelijk afbrandscenario. d. Geen UHD-inzet als er geen overzicht is van de situatie. e. Team Digitale Verkenning eventueel raadplegen.
10.	Geen overzicht door meerdere batterijen in thermal runaway	a. Geen UHD-inzet als er geen overzicht is van de situatie. b. Defensief optreden, mogelijk afbrandscenario. c. Overweeg ondersteuning van Team Digitale Verkenning .

Risico	Beheersmaatregelen en aandachtspunten
11. Hotspots zijn niet te lokaliseren	a. Verwijder de buitenste beplating indien dit veilig kan. b. Indien locatie niet bekend: start blussing in de middelste module.
12. UHD-inzet faalt	Stop de UHD-blussing en overweeg: a. Het kapot spuiten van de batterij-cellen met UHD-blussysteem (en eventueel grit). b. Inzet lagedrukstraal. c. Afbrandscenario batterij. d. Dompelen van batterijpakket, wanneer dit veilig mogelijk is.
13. Fysische explosie door stoomuitzetting in het batterijpakket	a. Onderbreek het gebruik van het UHD-blussysteem. Bijvoorbeeld 15 seconden aan, even uit, effect controleren, nog eens 15 seconden, om het wel of niet uittreden van stoom te kunnen waarnemen.

4.3 Taakverdeling TS-bemanningen en UHD-team



Figuur 4.1 Schematische weergave UHD-inzet en taakverdeling

Tijdens de risicoanalyse en het ontwerpen van de veiligheidsmaatregelen is naar voren gekomen dat voor het beschermen van de UHD-bediener naast het UHD-team nog twee tankautospuiten nodig zijn, zodat er voldoende brandweerpersoneel is om zowel de batterijpakketten te monitoren alsook het UHD-personeel dekking te bieden door middel van lagedrukstralen, alsook voertuigonderdelen af te schermen tegen mogelijke effecten vanuit de batterij. Hiertoe is een taakverdeling gemaakt. De verschillende taken zijn weergegeven in Figuur 4.1 en worden in de volgende paragrafen uitgewerkt. In de figuur is verder aangegeven dat ploegleden zich niet dienden te begeven direct voor of achter het voertuig, vanwege mogelijk rolgevaar tijdens de inzet.[12] Verder is een binnencirkel gehanteerd van 3

[12] Bij de testvrachtwagens was geen sprake van rolgevaar, omdat de banden leeg waren en de vrachtwagens op tegels waren geplaatst.

meter waarbinnen alleen UHD-personeel zou komen (geel) en een buitencirkel van 12 meter waarin altijd ademlucht gedragen diende te worden (rood).

4.3.1 Taken UHD-eenheid

In deze paragraaf worden de taken van de UHD-eenheid uitgewerkt. Er zijn zes UHD-ploegleden. De UHD-ploegleden zijn de zwart ingekleurde iconen, en de bevelvoerder van de UHD-eenheid is weergegeven als een rood ingekleurd icoon.

Bevelvoerder (BV UHD)

> Contact met de OvD en de bevelvoerders van de basiseenheid en stemt de inzet met hen af.
> Bepaalt samen met de bevelvoerders van de TS-basiseenheden en OvD het moment dat het UHD-blussysteem veilig kan worden ingezet.
> Houdt overzicht over het incident samen met de bevelvoerder van de TS-basiseenheid en de OvD.

Chauffeur (Bediener module)

> Bedient de module van het UHD-blussysteem en houdt de tijd van de UHD-inzet bij op de stopwatch.
>

Bediener van de lans (Bediener lans)

> Koelt het accupakket intern om de thermal runaway te stoppen en handelt op basis van signalen, geluiden, gevoel en op aanwijzingen van de bediener van de warmtebeeldcamera (WBC).

Bediener van de warmtebeeldcamera (Bediener WBC, 2de persoon bij lansbediener):

> Verwijdert de buitenste plaat bij de accu indien mogelijk.
> Bepaalt of de accu betrokken is bij de brand.
> Indien ja, maakt hij of zij een schatting van de locatie van de thermal runaway.
> Geeft advies over de juiste plek voor de UHD-inzet en houdt hierbij rekening met de windrichting.
> Monitort het incident met de WBC.

Eerste veiligheidsman/-vrouw[13] *(Veiligheidsman/-vrouw links, verantwoordelijk voor de veiligheid aan de linkerzijde van het UHD-team)*

> Zorgt dat de veiligheidsprocedure van het UHD-blussysteem wordt nageleefd.
> Plaatst en bedient de ventilator.
> Houdt de bediener van de lans in de gaten tijdens het koelen van het accupakket.
> Draagt zorg dat, tijdens de UHD-inzet, de LD-bedieners (lagedrukstraal-bedieners) aan de linkerzijde hun taak uitoefenen.

Tweede veiligheidsman/-vrouw *(Veiligheidsman/-vrouw rechts, verantwoordelijk voor de veiligheid aan de rechterzijde van het UHD-team)*

> Zorgt dat de veiligheidsprocedure van het UHD-blussysteem wordt nageleefd.
> Controleert of er geen ophopingen van gassen zijn.
> Draagt zorg dat, tijdens de UHD-inzet, de LD-bedieners aan de rechterzijde hun taak uitoefenen.

[13] Dit zijn de veiligheidsmannen/-vrouwen van het UHD-team, niet de algemene veiligheidsfunctionarissen van de praktijk-experimenten. Tijdens het praktijkexperiment zijn er twee veiligheidsfunctionarissen die onafhankelijk van de deelnemende eenheden toezicht houden op de veiligheid.

4.3.2 Taken TS-bemanningen

In deze paragraaf worden de taken van de TS-bemanningen tijdens de UHD-inzet beschreven. De inzet bestaat uit twee fasen. Fase 1 betreft het bestrijden van de brand aan de elektrische vrachtwagen volgens de reguliere procedure voor (elektrische) voertuigbranden: het voertuig wordt afgeblust totdat alleen nog sprake is van thermal runaway in het accupakket. In de ideale situatie betekent dit dat alle vlammen zijn gedoofd, al blijft het mogelijk dat later opnieuw steekvlammen uit het accupakket optreden als gevolg van nieuwe batterijcellen die in thermal runaway gaan.

Fase 2 start zodra het UHD-team aankomt. Om voldoende dekking en veiligheid voor de UHD-bediener te kunnen waarborgen, is ondersteuning door twee TS-bemanningen noodzakelijk. De taken van de TS-ploegen bij aankomst van het UHD-team zijn hieronder weergegeven en corresponderen met de bijbehorende figuur 4.1. In deze figuur worden de ploegleden van de eerste tankautospuit weergegeven met rode iconen, en de ploegleden van de tweede tankautospuit met blauwe iconen.

De bevelvoerders (110 en 120)

> Stemmen af met de bevelvoerder van de UHD-eenheid over de taken en inzettactiek.
> Bepalen samen met de bevelvoerder van de UHD-eenheid het moment dat het UHD-blussysteem veilig kan worden ingezet.
> Houden overzicht over het incident samen met de bevelvoerder van de UHD-eenheid.

Eerste TS LD-straal (LD 111 dekking fakkels, bestaat uit twee personen, namelijk 111 en 112)

> 1ste TS LD-straal 111 voor bestrijding van fakkels, blust en koelt continu tijdens de UHD-inzet (indien nodig), min of meer parallel aan het voertuig.

Tweede TS LD-straal (LD 121, bestaat uit twee personen: 121 en 122)

> 2de TS LD-straal 121 voor afscherming links en LD-straal 123 voor afscherming rechts van voertuigonderdelen of batterijpakketten.

Backup-ploeg (113 back-up, bestaat uit twee personen: 113 en 114)

> Deze twee ploegleden zijn als back-up beschikbaar.

De TS-chauffeurs (niet op de figuur, twee personen: 119 en 129)

> Bedienen de pomp van hun TS.

4.4 Inzettactiek UHD-team

In deze paragraaf wordt de inzettactiek van het UHD-team gepresenteerd, zoals die aan de hand van de expertsessie is ontwikkeld en vastgesteld. Deze tactiek was het uitgangspunt tijdens de twee praktijkexperimenten. Gezien het feit dat er (veel) onzekerheden waren in het brandverloop en het functioneren van het UHD-blussysteem in de context van brandende elektrische vrachtwagens, was het voor de deelnemende ploegen mogelijk om op basis van de eigen professionele inschatting af te wijken van hetgeen vooraf in de expertsessie was opgesteld. Om bij de UHD-inzet te assisteren was een externe deskundige aanwezig in uitrukkleding, namelijk een ervaren instructeur van een UHD-blussysteemfabrikant. Deze

zou (eventueel van dichtbij) kunnen meedenken en adviseren over een alternatieve aanpak.[14]

Relevante aandachtspunten bij het gebruik van de tactiek zijn hieronder uitgewerkt. Ze zijn gestructureerd volgens de gebruikelijke zes fasen van brandbestrijding, te weten alarmering, herkennen, verkennen, stabiliseren, bestrijden en nazorg.

4.4.1 Herkennen

Normaal gesproken worden tijdens het aanrijden het kenteken van het elektrische voertuig achterhaald en wordt in het Crash Recovery System (CRS) nagegaan waar het accupakket zich bevindt, zodat al vroeg kan worden nagedacht over mogelijke plekken om het UHD-blussysteem in te zetten. Omdat in dit onderzoek sprake was van een gecontroleerde testopstelling, waren deze gegevens reeds vooraf uitgewisseld en op papier overhandigd tijdens een briefing met de deelnemende ploegen.

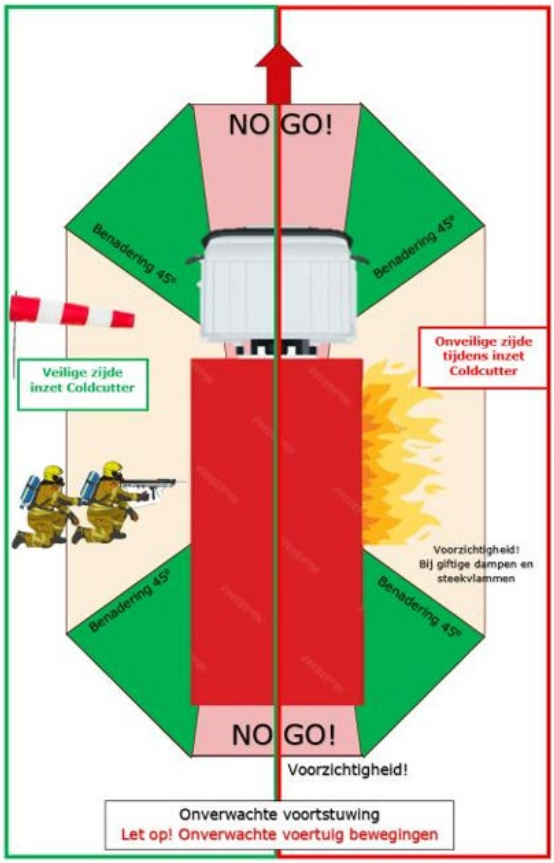
4.4.2 Verkennen

Tijdens de verkenning door het UHD-team wordt bij de reeds aanwezige tankautospuit geïnformeerd naar eventuele bijzonderheden, zoals de locatie van steekvlammen, hoorbare knallen van exploderende accucellen, mogelijke eerdere explosies van rookgassen en de vermoedelijke oorzaak van de brand. Vervolgens verkent het UHD-team het voertuig op plekken waar rookgassen zich kunnen ophopen en wordt met behulp van de WBC beoordeeld waar een mogelijke thermal runaway zich bevindt. Ter plaatse wordt ook de windrichting vastgesteld, zodat de inzetlocatie van het UHD-blussysteem veilig en tactisch verstandig kan worden gekozen.

4.4.3 Bestrijden

- Zorg dat het voertuig is afgeblust en alleen het batterijpakket nog in thermal runaway is.
- Plaats de ventilator bij het voertuig.
- Gebruik de WBC om inzetzijde en inzetplan van het UHD-blussysteem te bepalen en stem dit af met de bevelvoerder van de basiseenheid.
- Aan de inzetzijde bevindt zich een binnencirkel van 3m rond het inzet punt van het UHD-blussysteem. Binnen deze cirkel bevinden zich alleen de lansbediener en de bediener van de WBC.
- Rondom het voertuig bevindt zich de buitencirkel op een afstand van 12 meter van het UHD-inzetpunt. Buiten deze cirkel is er geen gevaar voor persoonlijk letsel veroorzaakt door het UHD-blussysteem als gevolg van (het uitschieten van de) ultrahogedrukstraal.
- Tussen de binnencirkel en de buitencirkel bevindt zich alleen het ademlucht dragende personeel dat deelneemt aan de inzet.
- De zijde tegenover die waar het UHD-blussysteem wordt ingezet, wordt bestempeld als onveilige zijde waar niemand meer mag komen als de UHD wordt ingezet (zie Figuur 4.2). De bevelvoerders (eventueel op advies van de veiligheidsfunctionarissen) bepalen wanneer de inzet van het UHD-blussysteem wordt gestopt. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn bij oplaaiende vlammen aan de onveilige zijde die moeten worden bestreden door de LD-ploeg

[14] Het was uiteindelijk niet nodig om een alternatieve aanpak te kiezen.



Figuur 4.2 Inzetlocatie UHD-bediener (R. Boekhorst, Veiligheidsregio Utrecht)

> Zorg dat de LD-ploegen klaar staan met de LD-straal.
> Ventileer de ruimtes waar de rookgassen zich mogelijk hebben opgehoopt.
> Blijf het voertuig (indien nodig) ventileren.
> Bevelvoerders van de UHD- en basiseenheid stellen gezamenlijk vast of iedereen uit de onveilige zijde is. Als dit het geval is, geeft de bevelvoerder van de UHD het sein dat de inzet van de UHD kan worden gestart.
> Eventueel aanwezige buitenbeplating van de batterijpakketten verwijderen indien dit veilig mogelijk is.
> Voer de blussing met de lans uit, onder een hoek van 90 graden (haaks op het accupakket).
> Monitor het accupakket minimaal 30 minuten op eventueel opwarmen. Indien het opnieuw opwarmt, dient de UHD-blussing nogmaals te worden uitgevoerd.

Aandachtspunten:

– Start de blussing met de UHD op het heetste punt om de ‚pdi;e waar de TR zich bevindt.
– De blussing is effectief als de temperatuur daalt en er stoom uit het accupakket komt.
– Indien de temperatuur niet daalt, kan de UHD op een ander punt worden ingezet (uit de praktijk blijkt dat de UHD een of meerdere keren op verschillende posities moet worden ingezet voor een effectieve inzet).
– Als het een gestapeld pakket is en als de WBC geen uitsluitsel geeft welke module betrokken is, start dan in het midden.

4.4.4 Nazorg

Na afloop van de inzet wordt conform het draaiboek afgebouwd en opgeruimd. Voor wat betreft arbeidshygiëne bij het opruimen wordt, afhankelijk van de pH-waarde van het vervuilde bluswater, overwogen om IBGS-PBM's zoals chemiehandschoenen en chemielaarzen te gebruiken. Daarnaast is het belangrijk dat het bluspak op de incident-locatie wordt uitgedaan en via het reguliere proces wordt aangeboden voor professionele reiniging, zodat verdere verspreiding van contaminanten wordt voorkomen.

4.5 Inbreng en vrije handelingsruimte van de deelnemende ploegleden

Tijdens de brandweerinzet heeft net als bij echte incidenten de bevelvoerder het uiteindelijke commando over zijn brandweerploeg. Beide bevelvoerders, en de bevelvoerder van de UHD-eenheid, vallen onder het commando van een Officier van Dienst. Het protocol biedt handvatten, maar geen strikte kaders voor de brandbestrijding. De brandweerploeg heeft de vrijheid om deze naar eigen inzicht uit te voeren, maar wel binnen de gestelde doelen. Hiermee wordt invulling gegeven aan het streven bij het ontwerp van de experimenten om aan te sluiten bij de praktijk en wordt tegelijkertijd de autonomie van de deelnemende ploegleden gerespecteerd. Alle leden van de brandweerploeg geven bovendien 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 onder-zoekers; ook hebben zij altijd de mogelijkheid om zich uit het experiment terug te trekken.

Afhankelijk van het daadwerkelijke brandverloop en het verloop van de UHD-inzet kan het nodig zijn om af te wijken van de hierboven besproken UHD-inzetstrategie. Tijdens de praktijkexperimenten zijn altijd twee experts van Coldcut Systems (een UHD-blussysteemfabrikant) beschikbaar voor advies en overleg. Een van hen draagt ook uitrukkleding en is een ervaren instructeur met negen jaar ervaring als UHD-instructeur; hij kan ter plaatse meekijken.

De projecteider heeft de leiding over de experimenten en kan altijd de test afbreken. Een manschap mag zich op elk moment terugtrekken en meldt dit dan aan zijn of haar bevelvoerder. De bevelvoerder kan altijd besluiten om zichzelf of zijn eenheden terug te trekken en het experiment te onderbreken. Als de bevelvoerder besluit om zich terug te trekken of het experiment kort wil onderbreken, dan treedt hij in overleg met de Officier van Dienst en de projectleider. Na dit overleg kan worden besloten om de test te hervatten of definitief af te breken. De bevelvoerder geeft zelf zijn instemming en bereidheid aan om het experiment in deze situatie te hervatten. De projectleider geeft vervolgens toestemming om de test te hervatten. Als wordt besloten om de test af te breken, dan wordt de in paragraaf 4.6 omschreven procedure ingezet. Het experiment kan dus onderbroken worden door:

- Officier van Dienst en Bevelvoerders
- Veiligheidsfunctionarissen
- Projectleider
- Als gevolg van het terugtrekken van (meerdere) individuele manschappen.

Dit is niet gebeurd tijdens de experimenten.

4.6 Procedure bij “falen” van de UHD-inzet tijdens de experimenten

De testvrachtwagens zullen zo zijn opgebouwd dat de batterijpakketten op een veilige manier te verwijderen zijn.[15] De batterijpakketten worden hiertoe op frames onder de vrachtwagen geplaatst. Ze staan daarmee los onder de vrachtwagen. Hierdoor zijn de batterijen veilig met behulp van een heftruck of verreiker te verwijderen. Wanneer de UHD-inzet “faalt”, dat wil zeggen de batterijbrand kan niet ter plaatste gestabiliseerd worden, dan kan gekozen worden door de projectleider om de batterijen onder te dompelen of gecontroleerd te laten uitbranden op een daartoe geëigende plek. Een dompelcontainer is aanwezig op de locatie van het experiment om het batterijpakket te dompelen.[16] De keuze tussen deze twee opties wordt op het moment zelf gemaakt en is mede afhankelijk van weersomstandigheden (eventuele effecten benedenwinds) en het brandgedrag van de batterijen.

Mochten de praktijkexperimenten om welke reden dan ook escaleren, dan is tijdens het experiment altijd de capaciteit van twee volledig bemande tankautospuiten aanwezig om escalatie naar de omgeving te voorkomen. Tevens is een industriële autospuit van de Gezamenlijke Brandweer direct inzetbaar om indien nodig aanvullende bluscapaciteit te kunnen leveren. Een dergelijke autospuit heeft een bluscapaciteit van 10.000 liter per minuut.[17] Daarnaast kan ook een beroep worden gedaan op de nabijgelegen brandweerkazernes van de Gezamenlijke Brandweer voor aanvullende eenheden.

[15] Anders dan bij elektrische personenauto’s is dit bij de systeemopbouw van de testvrachtwagens wel mogelijk.
[16] Eerder in het document is beschreven dat er geen publiek beschikbare dompelcontainer bestaat voor elektrische vrachtwagens; geen enkele bestaande container is groot genoeg om een elektrische vrachtwagen in te takelen. In deze situatie is het batterijpakket echter demontabel en wordt alleen het batterijpakket gedompeld, zodat het wel in een reguliere dompelcontainer past.
[17] Ter referentie: een straal lage druk heeft een capaciteit van ca. 450 liter per minuut.

5 Meetresultaten eerste experiment

In dit hoofdstuk worden de visuele waarnemingen, meetresultaten en uitkomsten van de vragenlijsten en groepsinterviews van het eerste experiment weergegeven. Deze resultaten worden in hoofdstuk 7, samen met de resultaten van het tweede experiment (hoofdstuk 6), geanalyseerd en geduid.

5.1 Audiovisuele waarnemingen tijdens het experiment

Door twee brandonderzoekers (observatoren) van de Veiligheidsregio Utrecht en de Veiligheidsregio Haaglanden is aan de hand van het observatieprotocol een tijdlijn bijgehouden van de waargenomen gebeurtenissen. De volledige notulen van beide brandonderzoekers zijn opgenomen in Bijlage 5. Op basis van deze notulen is een tijdlijn met beeldverslag gemaakt van het brandverloop en de daarbij behorende visuele waarnemingen, ondersteund met beelden uit de beschikbare videocamera's. Deze zijn eveneens weergegeven in Bijlage 5.

In het beeldverslag in Bijlage 5 wordt de gehanteerde tijdlijn van het praktijkexperiment gevolgd. Voor wat betreft de tijd worden telkens de kloktijd (CEST) en de tijd vanaf start experiment (EXP) worden genoemd. Hierbij geldt dat de tijd van het experiment start op het moment dat de eerste initiatieschroef in het batterijpakket wordt gebracht. (10:34:00 CEST = +0:00:00 EXP). De tijd van het experiment eindigt op het moment waarop de brandweerinzet wordt beëindigd (12:14:00 CEST = +1:40:00 EXP). Ook in deze paragraaf worden zowel de kloktijd als de relatieve experimentele tijd genoemd (beide uitgedrukt als uur : minuut : seconde).

In deze paragraaf zal aan de hand van foto’s die door de fotografen zijn gemaakt een beschrijving worden gegeven van het beeldverslag met de visuele waarnemingen. Aan het eind wordt een samenvatting gegeven van de relevante waarnemingen voor de verdere analyse. Om het verloop van het experiment overzichtelijk te beschrijven, is op basis van de tijdlijn een indeling in vier fasen gemaakt.

1. Van het inbrengen van de eerste schroef in het batterijpakket tot de handmatige ontsteking van de lading.
2. Van de handmatige ontsteking van de lading tot de inzet van de eerste lagedrukstraal door de TS-bemanning.
3. Van de inzet van de eerste lagedrukstraal door de TS-bemanning tot de eerste handelingen van de UHD-ploeg aan het batterijpakket.
4. Van de eerste handelingen van de UHD-ploeg aan het batterijpakket tot het beëindigen van de brandweerinzet.

5.1.1 Thermische propagatie in het batterijpakket

Kloktijd (CEST): 10:34:00 tot 10:54:40
Tijd sinds start experiment (EXP): +0:00:00 tot +0:20:40
Duur: 20 min 40 s

Het experiment start met het inbrengen van een eerste schroef in de onderste module van het batterijpakket om thermal runaway te initiëren (Figuur 5.1). Ongeveer 35 seconden later wordt ook een tweede schroef ingebracht in dezelfde module. Zes seconden voor het inbrengen van deze tweede schroef wordt hierbij al een eerste plofgeluid waargenomen, wat erop wijst dat een batterijcel als gevolg van het inbrengen van de eerste schroef reeds is opengebarsten. Gedurende de daaropvolgende elf minuten zijn met regelmaat plofgeluiden hoorbaar die wijzen op afzonderlijke batterijcellen die in thermal runaway raken. Tegelijkertijd komen batterijgassen en -dampen vrij, die al enkele seconden na het inbrengen van de tweede schroef zichtbaar worden (Figuur 5.2).

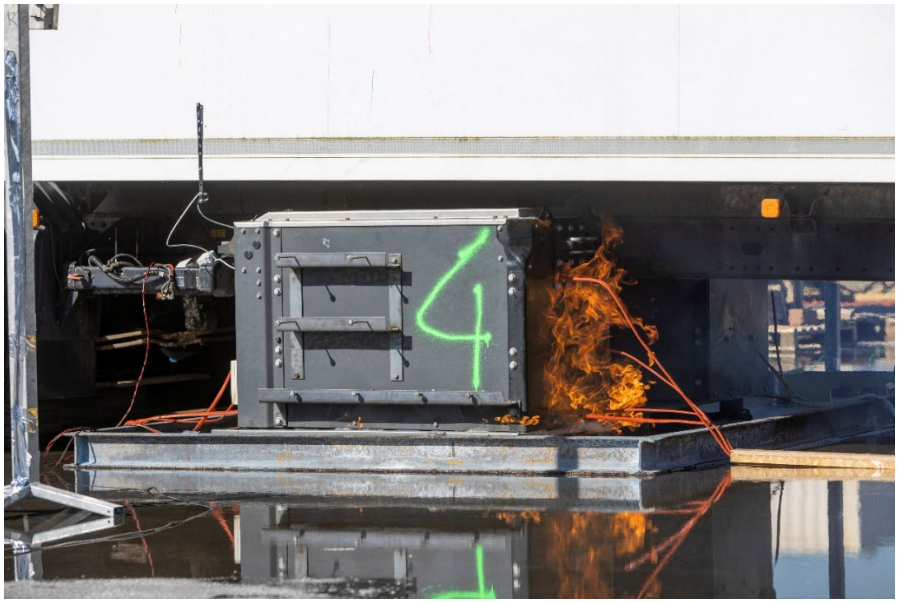
Na ongeveer elf minuten worden de eerste vlamverschijnselen rondom het batterijpakket waargenomen. Deze ontstaan doordat de vrijgekomen batterijgassen worden ontstoken door de aangebrachte vonkengenerator. In de minuten daarna nemen de vlamverschijnselen geleidelijk toe (Figuur 5.3). Ongeveer zeven minuten later wordt gedurende circa één seconde een fakkel vanuit het batterijpakket waargenomen. Ondanks deze brandverschijnselen wordt geen uitbreiding van de brand naar de voertuigcarrosserie of de lading vastgesteld. Na in totaal 20 minuten en 40 seconden wordt de lading onder de houten pallets handmatig ontstoken met behulp van een gasbrander.



Figuur 5.1 Initiatie van thermal runaway door inbrengen van schroeven



Figuur 5.2 Vrijkomen van batterijgassen



Figuur 5.3 Batterijgassen na ontsteking

5.1.2 Ontwikkeling van de voertuig- en ladingbrand

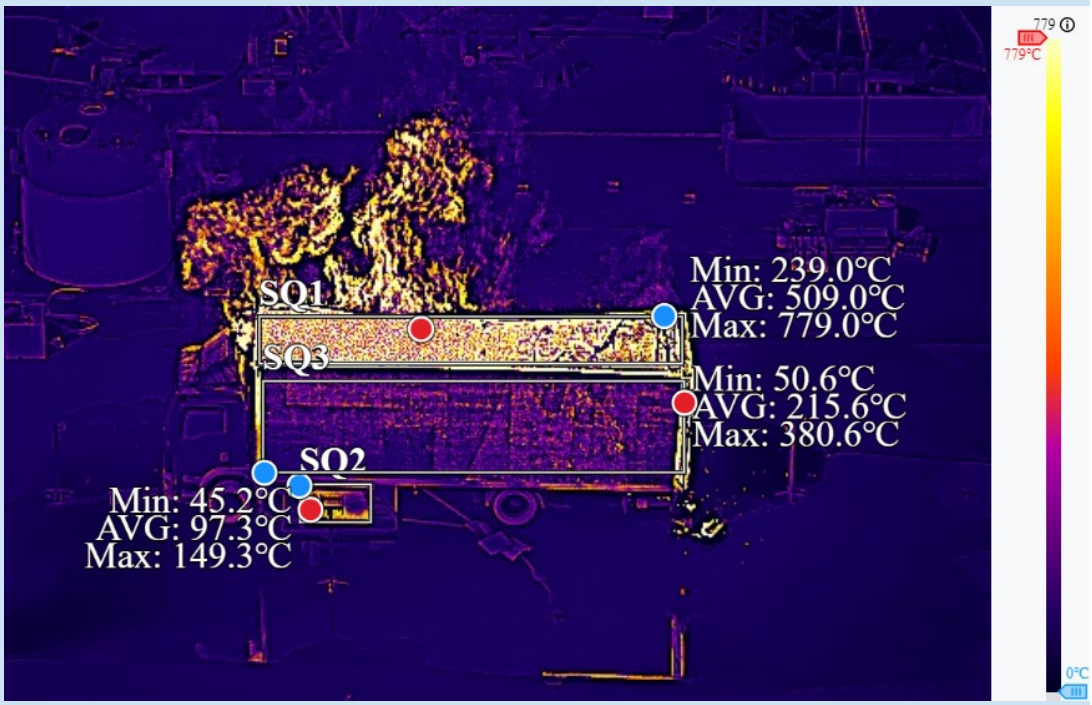
Kloktijd (CEST): 10:54:40 tot 11:13:04
Tijd sinds start experiment (EXP): +0:20:40 tot +0:39:04
Duur: 18 min 24 s

Na het handmatig ontsteken van de lading ontwikkelt de brand zich gedurende enkele minuten in de houten pallets in de laadruimte. Na ongeveer 8 minuten en 35 seconden zijn aan de buitenzijde van de laadruimte rook- en vlamverschijnselen waarneembaar, waarop de eerste tankautospuit en de Officier van Dienst worden gealarmeerd. De brand ontwikkelt zich vervolgens snel verder. Ruim zes minuten later staat niet alleen de laadruimte in brand, maar heeft het vuur zich ook uitgebreid naar het dak van de opbouw en richting de chauffeurscabine (Figuur 5.4). Daarmee is sprake van een volledig ontwikkelde voertuig-brand. Ongeveer vier minuten later wordt de eerste lagedrukstraal ingezet om de brand te bestrijden.



Figuur 5.4 Ontwikkelde voertuig- en ladingbrand met instabiel batterijpakket

Warmtebeeld van de drone bij aankomst van de brandweerploegen



Figuur 5.5 Warmtebeeld van de drone van de ontwikkelde voertuigbrand

In Figuur 5.5 is een warmtebeeld weergegeven opgenomen door de drone die door Team Digitale Verkenning werd bestuurd. Dit beeld is van 11:13 CEST (+0:39 EXP), het tijdstip dat de voertuig- en ladingbrand was ontwikkeld en de brandweer ter plaatse arriveerde. Het beeld geeft daarmee de situatie weer die de brandweerploeg bij aanvang van het incident aantrof. In de figuur zijn van drie rechthoeken (SQ1, SQ2 en SQ3) de minimum (Min. en de blauwe stip), maximum (Max. en de rode stip) en gemiddelde (AVG) temperatuur weergegeven.

SQ1 is het bovenaanzicht van de truck vanaf de drone en laat de hoogste temperaturen zien. Deze zullen echter vanaf de grond niet waarneembaar zijn met een WBC. SQ3 laat de temperaturen zien die vanaf de zijwand van de vrachtwagen.

SQ2 laat de temperaturen op de WBC van het batterijpakket zien. Er is weliswaar een verhoogde temperatuur waarneembaar op de buitenwand, maar deze ligt wel aanzienlijk lager dan de werkelijke temperatuur binnenin het batterijpakket. Hier wordt in paragraaf 5.2.2. verder op ingegaan.

5.1.3 Blussing voertuig- en ladingbrand

Kloktijd (CEST): 11:13:04 tot 11:40:04
Tijd sinds start experiment (EXP): +0:39:04 tot +01:06:04
Duur: 27 min 00 s

Na de eerste lagedrukstraalinzet wordt de brandbestrijding stapsgewijs opgeschaald. Ongeveer twee minuten later volgt een tweede lagedrukstraal, waarna korte tijd later met twee stralen gelijktijdig wordt gewerkt aan het blussen van de voertuigcarrosserie en de lading. Met de aankomst van een tweede tankautospuit worden binnen enkele minuten nog twee lagedrukstralen ingezet, waaronder een straal die specifiek wordt gebruikt voor het koelen van het batterijpakket. Op dat moment zijn twee tankautospuiten onder leiding van een Officier van Dienst actief betrokken bij de bestrijding van de brand (Figuur 5.6). Het UHD-team wordt om 11:18:05 (+0:44:05) gealarmeerd.

Ongeveer negen minuten nadat de vierde straal is ingezet, wordt met behulp van een spreider de laadklep geopend om de nog brandende lading beter bereikbaar te maken voor blussing. Vervolgens wordt nog circa 24 minuten ingezet op het beheersen van de voertuigbrand en het koelen van het batterijpakket vanaf de buitenzijde, waarna de UHD-ploeg start met koel- en bluswerkzaamheden aan het batterijpakket.



Figuur 5.6 Lagedrukblussing van de voertuig- en ladingbrand

5.1.4 UHD-inzet op het batterijpakket

Kloktijd (CEST): 11:40:04 tot 12:14:00
Tijd sinds start experiment (EXP): +01:06:04 tot +01:40:00
Duur: 33 min 56 s

De eerste inzet van het UHD-blussysteem duurt ongeveer 6 minuten en 35 seconden. Met behulp van een lans met verlengstuk (totale lanslengte 135 cm) wordt het batterijpakket gepenetreerd. Tijdens deze inzet is duidelijk stoomvorming zichtbaar als gevolg van de verdamping van het ingebrachte water (Figuur 5.7). Twee lagedrukstralen staan daarbij gereed ter bescherming van de UHD-bediener tegen mogelijk gevaar vanuit het batterijpakket of andere voertuigonderdelen (Figuur 5.8). Daarnaast wordt met WBC's continu gemonitord en houden veiligheidsfunctionarissen van de brandweerploegen toezicht op de omgeving en de positionering van de ventilatoren.

Na een onderbreking van nog geen twee minuten volgt een tweede UHD-inzet van 4 minuten en 48 seconden. Hierbij is minder stoomvorming zichtbaar dan tijdens de eerste inzet. Wel wordt waargenomen dat de lans tijdens het penetreren kort wegschiet, waardoor twee openingen in het batterijpakket ontstaan. Vervolgens wordt door deze tweede opening verder ingezet. Na afloop van deze inzet wordt weglekkend water geconstateerd.

Ongeveer zeven minuten later rapporteert een brandonderzoeker nog een klein rookpluimpje, dat niet zichtbaar is op de videobeelden. Vervolgens worden geen rook- of vlamverschijnselen meer waargenomen. Ook tijdens de resterende observatieperiode van ruim een half uur blijft het voertuig vrij van zichtbare brandverschijnselen.



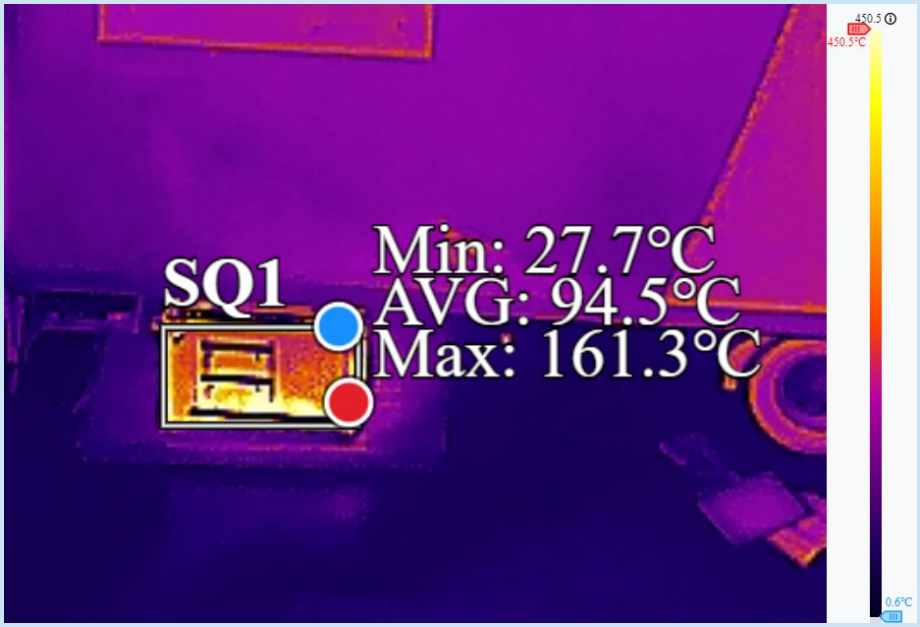
Figuur 5.7 UHD-inzet op batterijpakket met vrijkomende stoom als indicator voor koeling



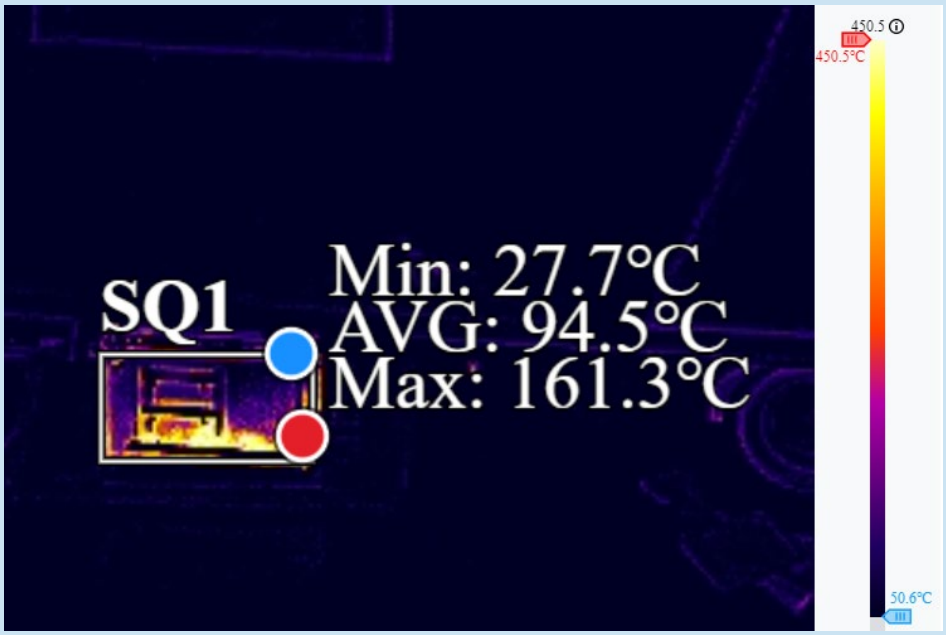
Figuur 5.8 UHD-inzet op batterijpakket onder dekking van twee lagedrukstralen

Warmtebeeld van de drone van Team Digitale Verkenning voor en na de UHD-inzetten

In Figuur 5.9 is het warmtebeeld van het batterijpakket van de drone weergegeven op het tijdstip dat de UHD-inzet werd voorbereid door de UHD-ploeg. Het beeld is gemaakt op het tijdstip 11:51 CEST. Er is een verhoogde temperatuur te zien, aan de onderzijde het hoogste. In Figuur 5.10 is hetzelfde warmtebeeld weergegeven; hier is echter de temperatuurschaal aangepast en zijn enkel temperaturen vanaf 50 graden Celsius en hoger weergegeven op de schaal met het programma *DJI Thermal Analysis Tool 3*. Met deze aangepaste schaalinstellingen wordt beter zichtbaar waar lokaal de meeste verhitting is. In de figuren zijn de laagst gemeten temperatuur (Min. en blauwe stip), hoogst gemeten temperatuur (Max. en rode stip) en gemiddelde (AVG) weergegeven binnen het vierkant SQ1 dat het batterijpakket omsluit.

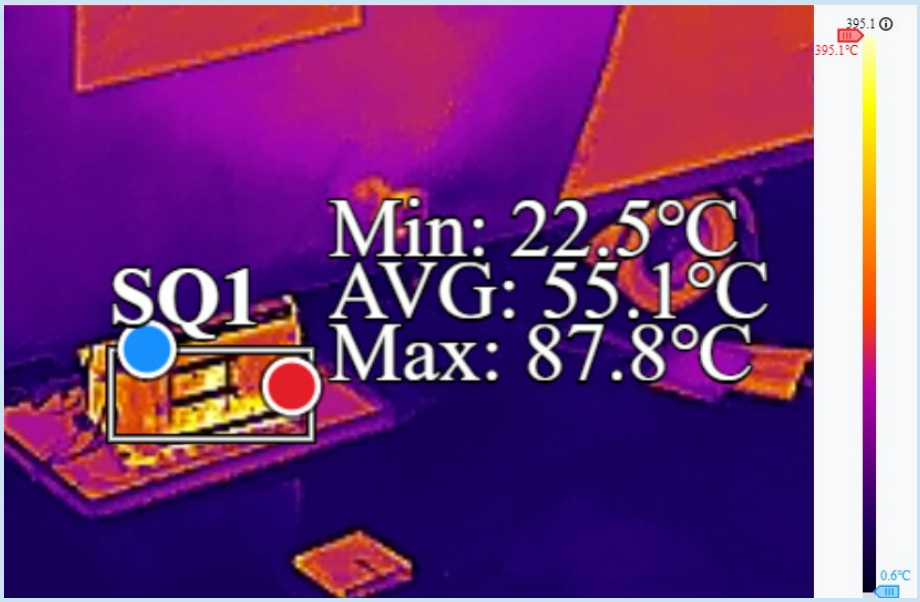


Figuur 5.9 Warmtebeeld van de drone met standaardinstellingen om 11:51 CEST (+1:13 EXP)

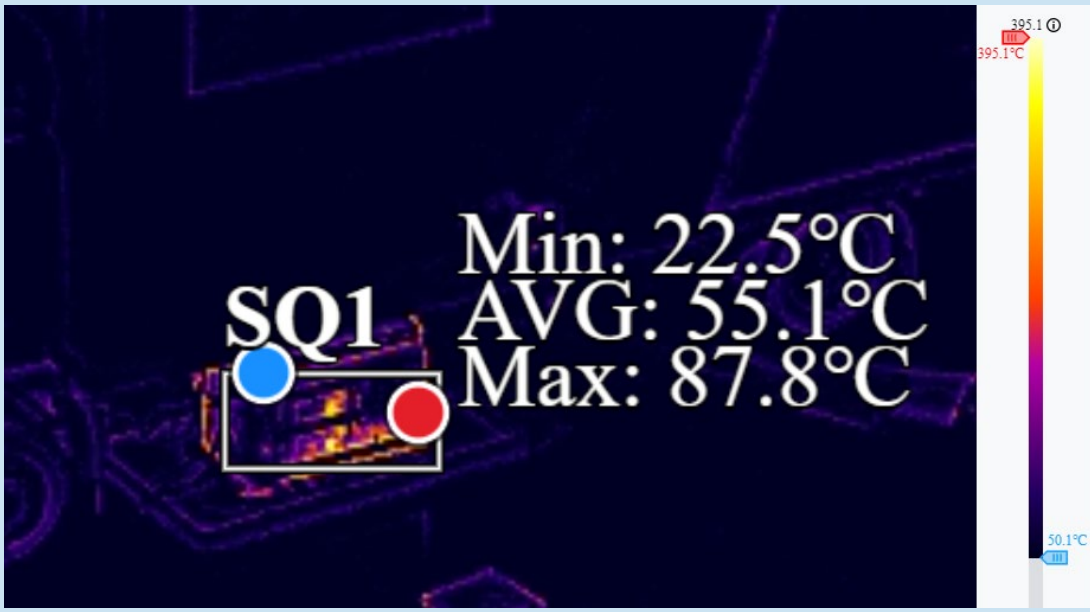


Figuur 5.10 Warmtebeeld batterijpakket van de drone met aangepaste temperatuurschaal om 11:51 CEST (+1:13 EXP)

In Figuur 5.11 en Figuur 5.12 is het warmtebeeld van de drone weergegeven respectievelijk met de standaardinstellingen en met een aangepaste temperatuurschaal op het tijdstip na de twee UHD-inzetten, namelijk om 12:09 CEST (+1:35 EXP). Hierop is te zien dat zowel de hoogst gemeten temperatuur alsook de gemiddelde temperatuur afnemen. Tevens blijkt dat met een aangepaste temperatuurschaal verhitte delen van het batterijpakket beter zichtbaar kunnen worden op het warmtebeeld.



Figuur 5.11 Warmtebeeld na UHD-inzetten van de drone om 12:09 CEST (+1:35 EXP)



Figuur 5.12 Warmtebeeld na UHD-inzetten van de drone om 12:09 CEST (+1:35 EXP) met aangepaste temperatuurschaal

5.1.5 Overzicht van relevante waarnemingen

Samenvattend zijn voor wat betreft brandverloop en verloop van de brandweerinzet de volgende relevante waarnemingen aan te duiden:

- Na initiatie door meerdere schroeven volgt een periode van elf minuten waarin afzonderlijke cellen zijn te horen die in thermal runaway gaan; dat wijst op thermische propagatie. Tijdens deze elf minuten komt alleen rook vrij.
- Na ontsteking van de gassen zijn er vlamverschijnselen rondom het batterijpakket zichtbaar. Deze vlamverschijnselen zorgden er niet voor dat de voertuigcarrosserie en lading ook in brand raakten.
- Nadat de lading door een gasbrander was aangestoken, was binnen negen minuten sprake van een volledige ontwikkelde vrachtwagenbrand, waarbij de lading aantoonbaar in brand stond, van buitenaf waarneembaar aan de hand van rook- en vlamverschijnselen uit de laadbak.
- Tijdens de eerste inzet zijn vier lagedrukstralen van twee tankautospuiten ingezet om de voertuigbrand te bestrijden, waarna na 39 minuten na start van de brandweerinzet het UHD-blussysteem voor het eerst op het batterijpakket is ingezet.
- Bij de eerste UHD-inzet was binnen enkele seconden na het doorsnijden van de behuizing duidelijk stoom zichtbaar.
- Na de tweede UHD-inzet is weglekkend water waargenomen.
- Na de UHD-inzetten zijn geen zichtbare vlam- en rookverschijnselen meer waargenomen uit het batterijpakket

5.2 Temperatuurmetingen in het batterijpakket

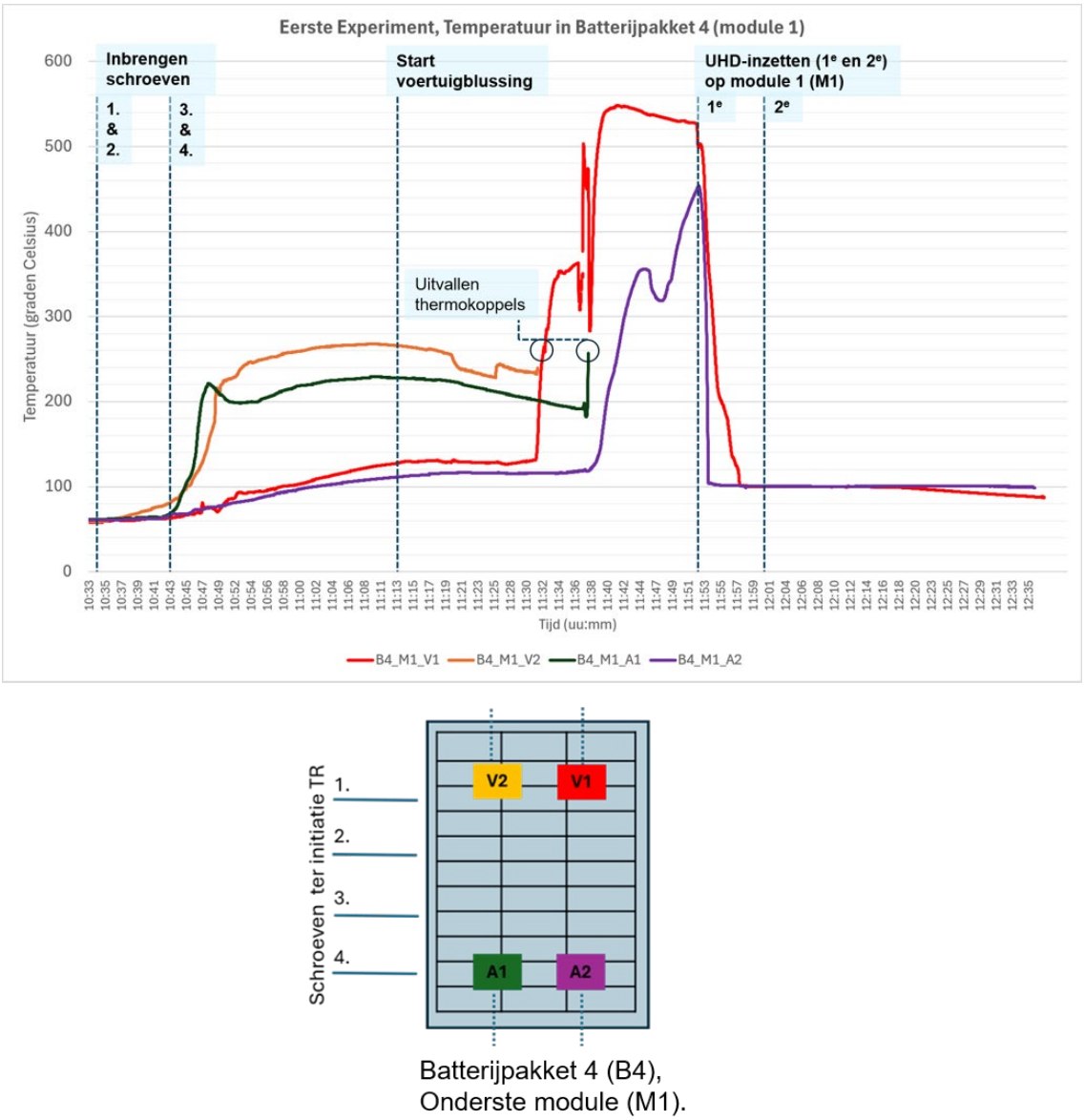
5.2.1 Thermokoppels in het batterijpakket

Zoals beschreven in de meetopstelling in paragraaf 3.3 zijn tijdens het experiment temperatuurmetingen uitgevoerd in twee batterijpakketten onder de testvrachtwagen:

batterijpakket 4 (B4, chauffeurszijde) en batterijpakket 3 (B3, bijrijderszijde). Beide batterijpakketten bestonden uit drie modules: een onderste module (M1), een middelste module (M2) en een bovenste module (M3). Thermal runaway is in de onderste module (M1) geïnitieerd.

Batterijpakket 4, Module 1

In Figuur 5.13 zijn de temperatuurmetingen van de onderste module van batterijpakket 4 (B4_M1) te zien, waarbij met verticale stippellijnen de start van de thermal runaway, de start van de voertuigblussing en de uitgevoerde UHD-inzetten zijn weergegeven. B4_M1 betreft de module waarin de thermal runaway is geïnitieerd en waarin de UHD-inzet heeft plaatsgevonden.



Figuur 5.13 Temperatuurverloop eerste experiment batterijpakket 4, module 1

Van de vier meetpunten zijn twee meetpunten gedurende het experiment uitgevallen, namelijk B4_M1_V2 rond 11:32 en B4_M1_A1 rond 11:38. De andere twee thermokoppels (B4_M1_V1 en B4_M1_A2) zijn tot het einde van het experiment in werking gebleven. De codering B4_M1_V2 verwijst naar thermokoppel *Batterijpakket 4 – Module 1 – Voorkant 2*,

conform de beschrijving in de meetopstelling in paragraaf 3.3 en weergegeven onder de grafiek.

Aan het begin van het experiment (circa 10:33) liggen de gemeten temperaturen dicht bij elkaar, rond de 60 à 70 °C, overeenkomstig de temperatuur waarop het batterijpakket werd voorverwarmd voor de experimenten. Vervolgens treedt na de thermal runaway-initiatie door het inbrengen van schroeven een temperatuurstijging op. Met name de sensoren B4_M1_V2 en B4_M1_A1, beide gelegen aan de zijde waar het batterijpakket werd gepenetreerd, laten een relatief snelle stijging zien tot respectievelijk circa 260 – 270 °C en 220 – 230 °C. Deze temperatuurstijging wordt waargenomen, nadat op meerdere locaties schroeven in het batterijpakket zijn ingebracht. Vanaf circa 11:30 neemt de temperatuurstijging verder toe tot circa 350 °C; vanaf 11:39 stijgt deze nog verder bij één meetpunt (B4_M1_V1) tot boven de 500 °C, met piekwaarden rond de 540 á 550 °C.

Na de eerste UHD-inzet op het batterijpakket is op de nog functionerende thermokoppels een scherpe temperatuurdaling zichtbaar, waarbij de temperatuur binnen circa een tot vijf minuten daalt naar ongeveer 100 °C. Na deze snelle afname stabiliseren de gemeten waarden zich rond deze temperatuur. Vervolgens is het UHD-blussysteem een tweede maal ingezet om te onderzoeken of verdere afkoeling van het batterijpakket kon worden bereikt. In de temperatuurmetingen is na deze tweede inzet geen verdere significante temperatuur-daling zichtbaar.

Na afronding van de brandweerinzet is het batterijpakket circa 30 minuten gemonitord. Tijdens deze periode trad geen hernieuwde temperatuurstijging op. Aan het einde van de monitoringsperiode bedroegen de gemeten temperaturen op de twee nog functionerende thermokoppels respectievelijk 87 °C en 99 °C, waarna het experiment werd beëindigd.

Batterijpakket 4, Module 2 en 3 (geen thermal runaway)
Het temperatuursverloop van de modules M2 en M3 is weergegeven in Bijlage 9. Deze modules bevonden zich in hetzelfde batterijpakket waarin de onderste module in thermal runaway was gebracht en de UHD-inzet had plaatsgevonden. De metingen starten bij een temperatuur van circa 60 °C. Dit was de temperatuur tot waar alle batterijmodules waren voorverwarmd. Vervolgens is een temperatuurtoename van circa 20 °C zichtbaar; de maximale temperatuur die wordt bereikt, bedraagt 80 °C in de bovenste module. Beide meetpunten van de middelste module 2 zijn uitgevallen.

Batterijpakket 3, Module 1, 2 en 3 (geen thermal runaway)
De temperatuurmetingen van het batterijpakket waarin geen thermal runaway was geïnitieerd, zijn weergegeven in Bijlage 9. Uit de temperatuurmetingen van batterijpakket 3 (Bijlage 9), dat zich aan de tegenoverliggende zijde van de vrachtwagen bevond en niet betrokken was bij de thermal runaway of de UHD-inzet, blijkt dat tijdens het experiment geen temperatuurstijging is opgetreden.

Samenvattend leidt het bestuderen van de temperatuurmetingen tot de volgende resultaten die zullen worden besproken in de analyse van de resultaten in hoofdstuk 7:

- Direct na het inbrengen van het UHD-blussysteem in de module die in thermal runaway verkeert, daalt de inwendige temperatuur van het batterijpakket naar circa 100 °C.

- Na afloop van de UHD-blussysteem blijft de inwendige temperatuur in de gepenetreerde module gedurende circa 20 minuten rond 100 °C. Na circa 30 minuten is te zien dat de temperatuur verder is afgenomen tot 87 °C en 99 °C.
- In de modules waarin geen thermal runaway is geïnitieerd, maar die zich wel in hetzelfde batterijpakket als de module in thermal runaway bevinden, wordt een temperatuurtoename van maximaal circa 20 °C waargenomen tot een hoogst gemeten temperatuur van 80 °C.[18]
- In het batterijpakket waarin geen thermal runaway was geïnitieerd en geen UHD-inzet heeft plaatsgevonden, is geen temperatuurverhoging waargenomen.

5.2.2 Warmtebeeldcamera aan de buitenzijde van het batterijpakket en vergelijking met thermokoppels aan de binnenzijde

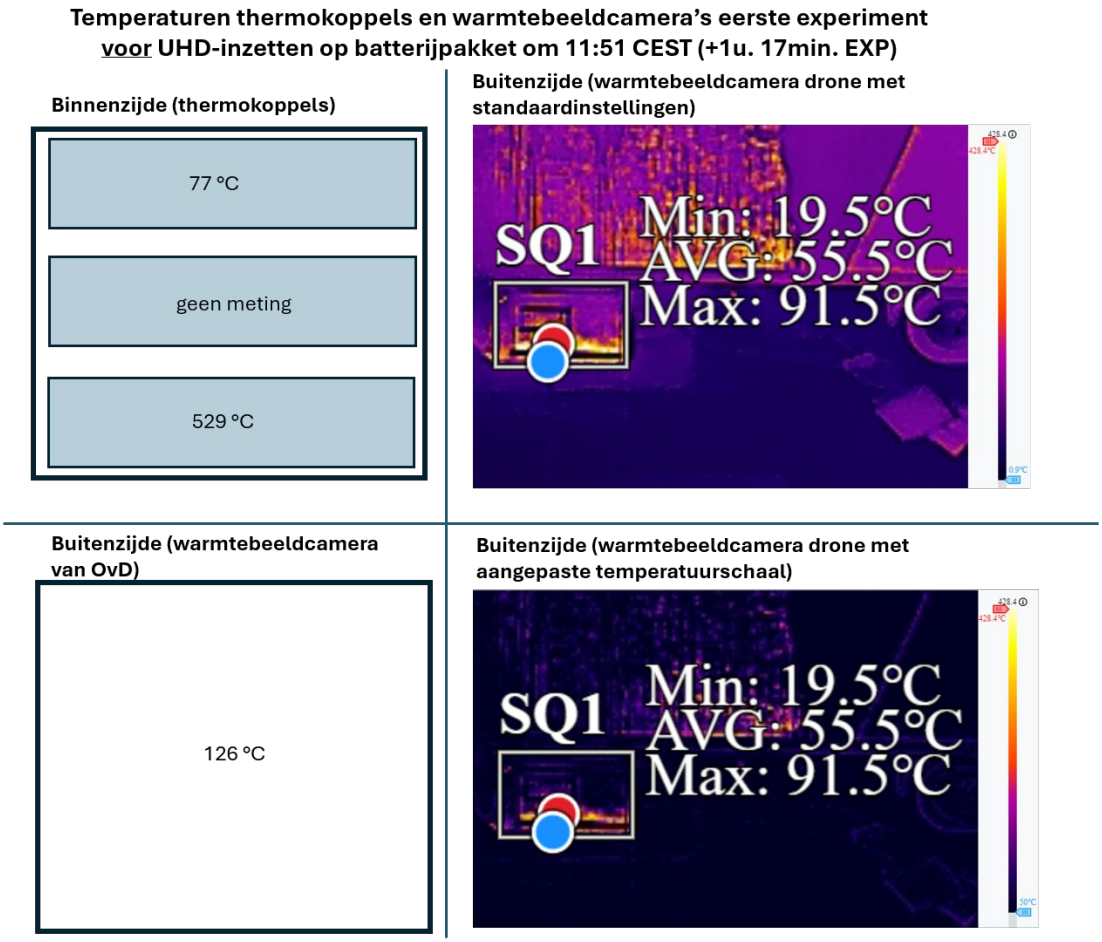
Naast de temperatuurmetingen met thermokoppels in het batterijpakket zijn tijdens de experimenten ook indicatieve temperatuurmetingen uitgevoerd met WBC's. Hierbij zijn zowel warmtebeeldopnamen gemaakt door de Officier van Dienst (zijn notulen weergegeven in bijlage 5) vanaf de grond als met behulp van een drone van Team Digitale Verkenning. Omdat WBC's uitsluitend een indicatie van de oppervlaktetemperatuur van het batterijpakket registreren, geven deze metingen geen direct beeld van de werkelijke temperaturen binnen de batterijmodules.[19] De combinatie van thermokoppelmetingen en warmtebeeldopnamen maakt het wel mogelijk om inzicht te verkrijgen in hoeverre WBC's bruikbaar zijn voor het identificeren van thermisch afwijkende locaties (hotspots) en het volgen van de temperatuurontwikkeling van het batterijpakket.

Figuur 5.14 en Figuur 5.15 tonen de interne temperaturen van de batterijmodules en de oppervlaktetemperaturen van het batterijpakket vóór en na de UHD-inzet tijdens het eerste experiment. Voorafgaand aan de UHD-inzetten registreerde de thermokoppel in de onderste module een temperatuur van 529 °C, hetgeen wijst op een thermal runaway. Met de WBC van de OvD is een temperatuur van 126 °C gemeten. Tegelijkertijd registreerde de WBC een gemiddelde oppervlaktetemperatuur van 55,5 °C en een maximale temperatuur van 91,5 °C.

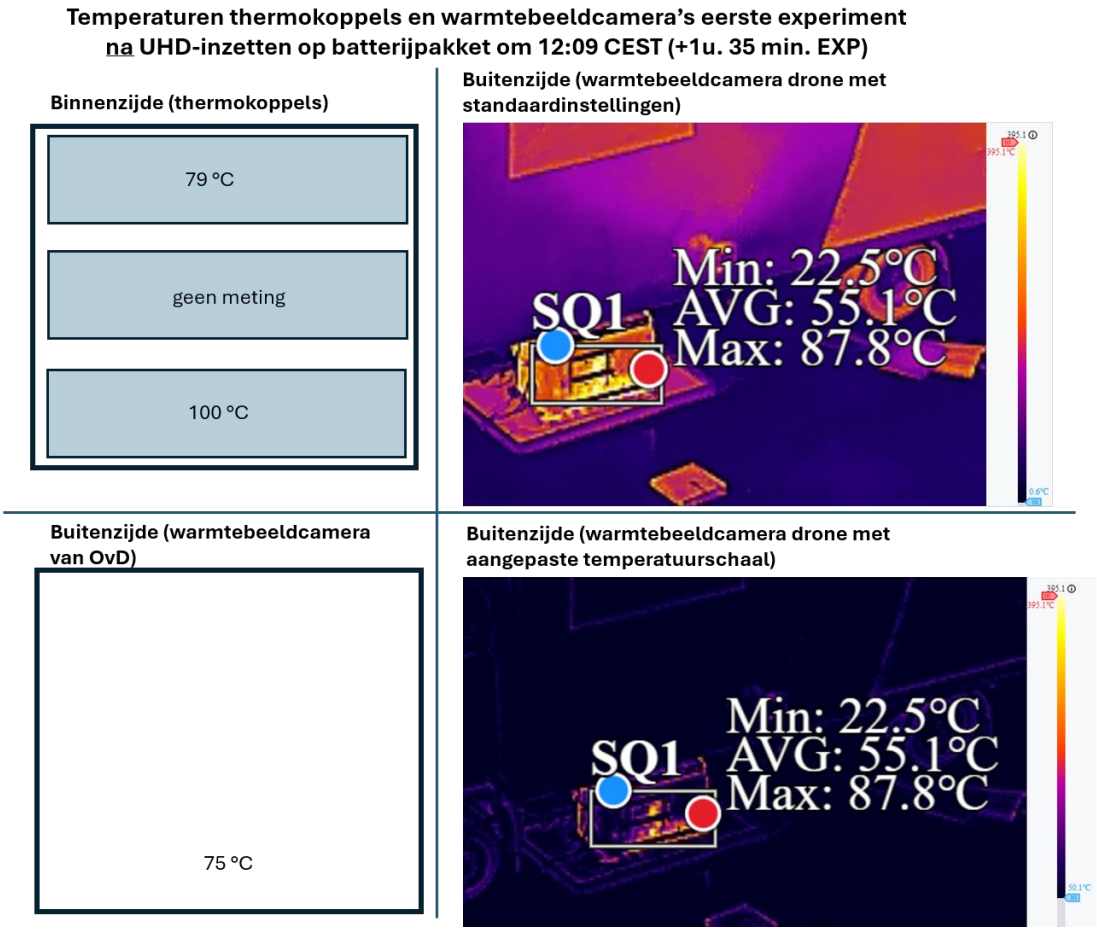
Na de UHD-inzetten was de temperatuur in de onderste module gedaald tot circa 100 °C, terwijl de temperatuur in de bovenste module nagenoeg onveranderd bleef op circa 80 °C. Deze afname was echter nauwelijks zichtbaar op de warmtebeelden van de drone. Het verschil in oppervlaktetemperatuur op de drone was namelijk van 55,5 °C naar 55,1 °C en de maximale oppervlaktetemperatuur van 91,5 °C naar 87,8 °C. De door de OvD gemeten temperatuurindicatie was na afloop van de UHD-inzetten wel lager. Dit waren echter indicatieve metingen. Bovendien was bij de eerste meting de locatie niet genoteerd, waardoor niet kon worden vastgesteld of op hetzelfde punt was gemeten.

Uit deze vergelijking volgt logischerwijs dat de gemeten oppervlaktetemperaturen aanzienlijk lager zijn dan de temperaturen die zich intern in de batterijmodules kunnen voordoen. Uit de dronebeelden zijn wel in beperkte mate de thermisch meest actieve delen van het batterijpakket te identificeren, maar de inwendige temperatuurdaling direct na de UHD-inzet is amper zichtbaar.

[18] De genoemde temperatuurtoename geldt voor de bovenste module (module 3); de thermokoppels in de middelste module (module 2) waren helaas uitgevallen.
[19] Dit wil zeggen dat temperatuurmetingen met een WBC een aanzienlijke afwijking kunnen hebben van de werkelijk temperatuur.



Figuur 5.14 Temperatuur op thermokoppels in vergelijking met indicatie op WBC's voor de UHD-inzetten bij het eerste experiment



Figuur 5.15 Temperaturen op thermokoppels in vergelijking met indicatie op WBC's na de UHD-inzetten bij het eerste experiment

5.3 Brandonderzoek batterijpakket na afloop van het experiment

In bijlage 7 van dit rapport is het verslag van Team Brandonderzoek met fotomateriaal van de uitgebrande batterijpakketten opgenomen. Dit verslag is gezamenlijk opgesteld door twee TBO'ers van Veiligheidsregio Haaglanden en Veiligheidsregio Utrecht. Als conclusie van dit verslag is na afloop van het eerste experiment het volgende vastgesteld.

Batterijpakket 4, Chauffeurszijde Voor

> Module 1 (onder): Alle batterijcellen in module 1 zijn volledig uitgebrand.
> Module 2 (midden): In module 2 waren twee beschadigde batterijcellen zichtbaar die zijn geraakt door het UHD-blussysteem. De rest van de batterijcellen in de module is intact gebleven. Verder was er lichte smeltschade aan de plastic behuizing.
> Module 3 (boven): Alle batterijcellen zijn volledig intact gebleven, met lichte smeltschade aan de plastic behuizing.

Batterijpakket 3, Bijrijderszijde Voor

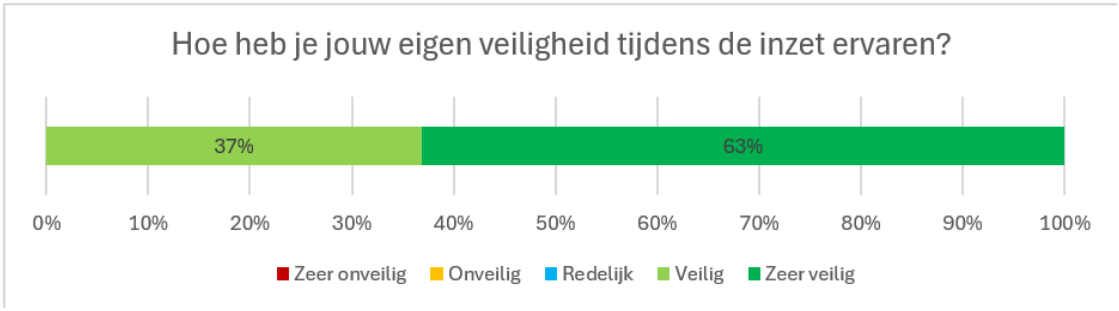
> Module 1 (onder): Alle batterijcellen zijn volledig intact gebleven.
> Module 2 (midden): Alle batterijcellen zijn volledig intact gebleven.
> Module 3 (boven): Alle batterijcellen zijn volledig intact gebleven.

5.4 Vragenlijsten en groepsinterviews

In deze paragraaf worden de uitkomsten besproken van de vragenlijsten en groepsinterviews van het eerste experiment om daarmee inzicht te geven in de praktische toepasbaarheid van het UHD-blussysteem. Bij alle vragen geldt dat 19 onderzoeksdeelnemers (N) de vragenlijst hebben ingevuld.

5.4.1 Ervaren veiligheid

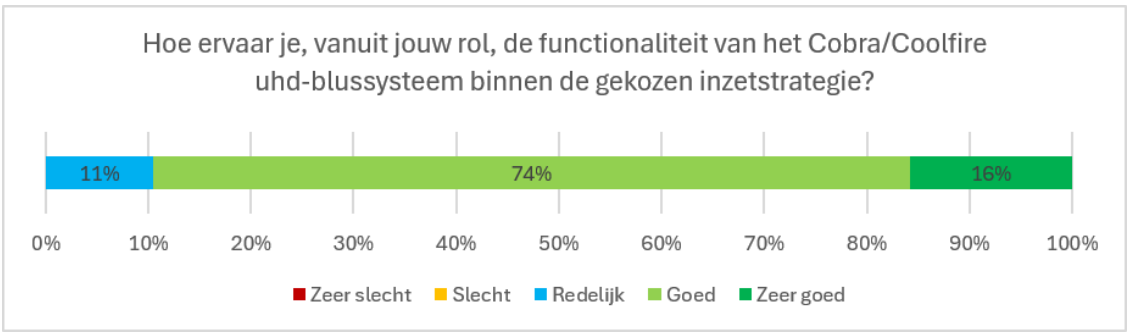
Tijdens de inzet voelden de deelnemers zich veilig tot zeer veilig. Dit kwam, zoals aangegeven in de groepsinterviews, door de getroffen veiligheidsmaatregelen, zoals lagedrukstralen, monitoring met warmtebeeldcamera's, bevelvoerders, de geplaatste ventilatoren, en het werken vanuit veilige hoeken en afstanden. Ook de constatering dat de temperatuur van de batterij, gemeten met de WBC, tijdens de inzet terugliep, droeg bij aan het veiligheidsgevoel.



Figuur 5.16 Eigen veiligheid tijdens de inzet

Uit het groepsinterview met de UHD-ploeg is wel gebleken dat de brandweerinzet voorafgaand aan de UHD-inzet als spannend en risicovol werd ervaren, vooral door de onbekendheid met het brandgedrag van het accupakket en de mogelijke effecten van de thermal runaway. Hoewel uiteindelijk alle deelnemers de inzet als (zeer) veilig hebben ervaren, benoemden zij enkele momenten als spannend, met name het openen van ladingklep, omdat onduidelijk was hoe de brand of vlammen zich zouden ontwikkelen. Deze momenten werden in de groepsinterviews echter niet als onveilig benoemd en zijn overigens ook niet gerelateerd aan de batterijbrand, maar aan een reguliere vrachtwagenbrand.

5.4.2 Functionaliteit UHD-blussysteem

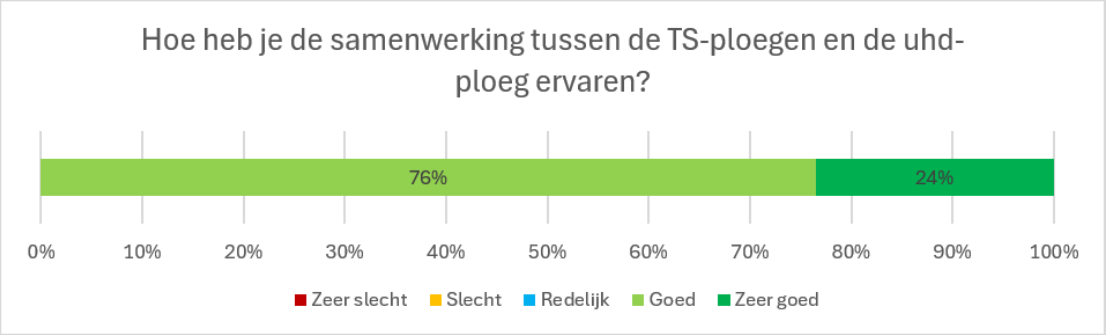


Figuur 5.17 Functionaliteit van het UHD-blussysteem

De functionaliteit van het UHD-blussysteem als inzetstrategie beoordelen de brandweermensen overwegend als goed.[20] Uit de groepsinterviews kwam wel naar voren dat het blussen van een brandende lithium-ion batterij in een vrachtwagen wel enigszins complex is. Zo is de locatie van hotspots op het batterijpakket vooraf niet altijd goed zichtbaar op de WBC.

Aanpassing van de positie van de UHD-lans op het accupakket leidde tot een snelle temperatuurdaling en minder vrijkomende rookgassen dan voor de UHD-inzet. Na het stoppen met blussen liep de temperatuur echter weer op. De bereikbaarheid en positie van het batterijpakket zijn bepalend voor de veiligheid en effectiviteit van de inzet; de ploegen gaven aan de batterij goed te kunnen benaderen. Dit is echter niet het geval wanneer deze zich bijvoorbeeld onder de cabine bevindt.

5.4.3 Samenwerking TS-ploegen en UHD-ploeg



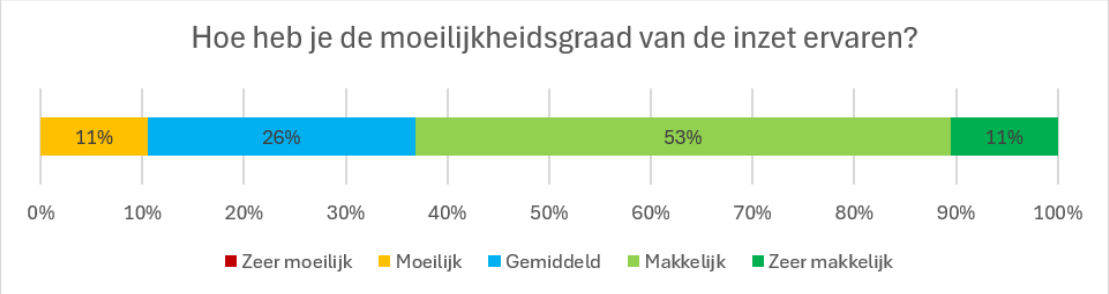
Figuur 5.18 Samenwerking tussen TS-ploegen en UHD-ploeg

Uit de vragenlijst komt een positief beeld naar voren over de ervaren samenwerking; dit wordt bevestigd in de groepsinterviews. Uitgesplitst naar functie beoordeelden de OvD en bevelvoerders de samenwerking het meest positief: drie van de vier gaven ‘zeer goed’ en één ‘goed’. Van de twaalf manschappen gaf één ‘zeer goed’ en de overige elf ‘goed’

Aangegeven wordt dat het contact tussen de bevelvoerders en Officier van Dienst als positief is ervaren. Wel blijkt door de UHD-ploeg een verschil te zijn ervaren tussen de TS-ploegen als het gaan om de bekendheid van de TS-ploegen met een UHD-inzet. De UHD-ploeg gaf aan dat “de 110” minder bekend was met UHD-inzetten en daardoor zoekend was hoe de UHD-inzet te ondersteunen. De “120” daarentegen was beter bekend met de werkwijze die met UHD-inzetten gepaard gaat, waardoor de inzet soepeler verliep bij de TS 2 dan bij de TS 1. Daarbij werd ook aangegeven dat de samenwerking tussen de manschappen enigszins werd bemoeilijkt doordat men elkaar niet altijd goed kon verstaan. Dit werd mede veroorzaakt door het geluid van de ventilatoren. Ondanks deze belemmering bleven de ploegen actief afstemming zoeken door elkaar op te zoeken en onderling verwachtingen uit te spreken, hetgeen als positief werd ervaren.

[20] Eén respondent heeft ‘zeer slecht’ aangekruist bij deze vraag. Hierbij is een opmerking geplaatst dat hij als chauffeur bij het voertuig stond en de brand niet goed kon zien. Dit antwoord is om die reden uit het overzicht gehaald en de individuele mening van deze deelnemer hebben wij zodoende niet kunnen verwerken in de uitslag van de vragenlijst.

5.4.4 Moeilijkheidsgraad

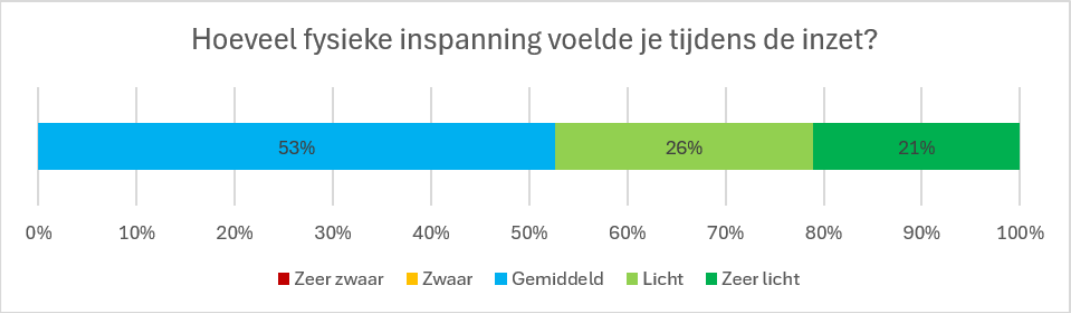


Figuur 5.19 Ervaren moeilijkheidsgraad van de inzet

De brandweerploegen ervoeren de moeilijkheidsgraad van de UHD-inzet als gemiddeld tot makkelijk. Drie van de vier OvD's en bevelvoerders beoordeelden de inzet als ‘gemiddeld’ en één als ‘makkelijk’. Acht van de twaalf manschappen beoordeelden de inzet als ‘makkelijk’ of ‘zeer makkelijk’, twee als ‘gemiddeld’ en twee als ‘moeilijk’. De manschappen die de inzet als moeilijk beoordeelden, lichtten toe dat de grootste uitdaging lag in het bereiken van de brand in de lading, met name doordat de laadklep gesloten was. Deze uitdaging is uiteraard niet gerelateerd aan bestrijding van thermal runaway in het batterijpakket.

De taakverdeling tussen eenheden was duidelijk en de inzet van het UHD-team op het batterijpakket werd gezien als een veilige en effectieve keuze. De ventilator werd vanwege de beperking van giftige en brandbare gassen als nuttig en laagdrempelig beschouwd, maar veroorzaakte tegelijkertijd veel geluidshinder en bemoeilijkte daarmee de communicatie tussen ploegleden. Het toepassen van elektrische ventilatoren kan hierbij geluidshinder aanzienlijk verminderen.

5.4.5 Fysieke inspanning



Figuur 5.20 Ervaren fysieke inspanning

De fysieke inspanning is door de deelnemende ploegen als gemiddeld tot (zeer) licht ervaren. Enkele handelingen vereisten fysieke inspanning, maar aangegeven werd dat deze niet afweken van andere vergelijkbare brandweerinzetten.

6 Meetresultaten tweede experiment

In dit hoofdstuk worden de visuele waarnemingen, meetresultaten en uitkomsten van de vragenlijsten en groepsinterviews van het tweede experiment weergegeven. Deze resultaten worden in hoofdstuk 7, samen met de resultaten van het eerste experiment, geanalyseerd en geduid.

6.1 Audiovisuele waarnemingen tijdens het experiment

Door twee brandonderzoekers (observatoren) van Veiligheidsregio Utrecht en Veiligheids-regio Haaglanden is aan de hand van het observatieprotocol een tijdlijn bijgehouden van de waargenomen gebeurtenissen. De volledige notulen van beide brandonderzoekers zijn opgenomen in Bijlage 6. Op basis van deze notulen is een tijdlijn met beeldverslag gemaakt van het brandverloop en de daarbij behorende visuele waarnemingen, ondersteund met beelden van de beschikbare videocamera's. Deze tijdlijn wordt eveneens weergegeven in Bijlage 6.

De tijdlijn start op het moment dat de eerste schroef in het batterijpakket wordt gebracht. Voor wat betreft de tijd zullen telkens de kloktijd (CEST) en de tijd vanaf start experiment (EXP) worden genoemd, (beide uitgedrukt als uur : minuut : seconde). Hierbij geldt dat de tijd van het experiment start op het moment dat de eerste schroef in het batterijpakket wordt gebracht. (10:12:30 CEST = +0:00:00 EXP). De tijd van het experiment eindigt op het moment waarop de brandweerinzet wordt beëindigd (12:59:03 CEST = +2:46:33 EXP).

Om het verloop van het experiment overzichtelijk te beschrijven, is op basis van de tijdlijn een indeling in vier paragrafen gemaakt.

1. Van het inbrengen van de eerste schroef in het batterijpakket tot de handmatige ontsteking van de lading.
2. Van de handmatige ontsteking van de lading tot de inzet van de eerste lagedrukstraal door de TS-bemanning.
3. Van de inzet van de eerste lagedrukstraal door de TS-bemanning tot de eerste handelingen van de UHD-ploeg aan het batterijpakket.
4. Van de eerste handelingen van de UHD-ploeg aan het batterijpakket tot het beëindigen van de brandweerinzet.

6.1.1 Thermische propagatie in het batterijpakket

Kloktijd (CEST): 10:12:30 tot 10:56:42
Tijd sinds start experiment (EXP): +00:00:00 tot +00:44:12
Duur: 44 min 12 s

Het praktijkexperiment begint met het inbrengen van de eerste twee schroeven in de onderste batterijmodule, waarmee een thermal runaway wordt geïnitieerd (Figuur 6.1). Al

binnen een minuut zijn de eerste effecten zichtbaar in de vorm van het vrijkomen van batterijgassen (Figuur 6.2). Gedurende ongeveer veertien minuten blijven met enige regelmaat ploffende geluiden hoorbaar en komen gassen vrij uit naden en kieren van het batterijpakket. Nadat deze verschijnselen tijdelijk zijn afnemen, worden twee extra schroeven in dezelfde module aangebracht. Hierdoor nemen zowel de gasvorming als het aantal hoorbare ploffende batterijcellen opnieuw toe; ze blijven ongeveer een kwartier aanhouden.

Vervolgens worden de vrijgekomen batterijgassen handmatig ontstoken. Hoewel de ontsteking op de videobeelden nauwelijks zichtbaar is, rapporteren observatoren kortdurende vlamverschijnselen. Kort daarna wordt ook de middelste batterijmodule in thermal runaway gebracht door het inbrengen van twee schroeven. Na een tweede ontsteking van de batterijgassen ontstaan blijvende vlamverschijnselen rondom het batterijpakket, die in de daaropvolgende minuten duidelijk in omvang toenemen (Figuur 6.3). Ongeveer drie kwartier na de start van het experiment wordt overgegaan op het handmatig ontsteken van de lading in de laadruimte van de vrachtwagen.



Figuur 6.1 Initiatie van thermal runaway door inbrengen schroeven



Figuur 6.2 Vrijkomende batterijgassen



Figuur 6.3 Batterijgassen na ontsteking

6.1.2 Ontwikkeling voertuig- en ladingbrand

Kloktijd (CEST): 10:56:42 tot 11:15:55
Tijd sinds start experiment (EXP): +00:44:12 tot +1:03:25
Duur: 19 min 13 s

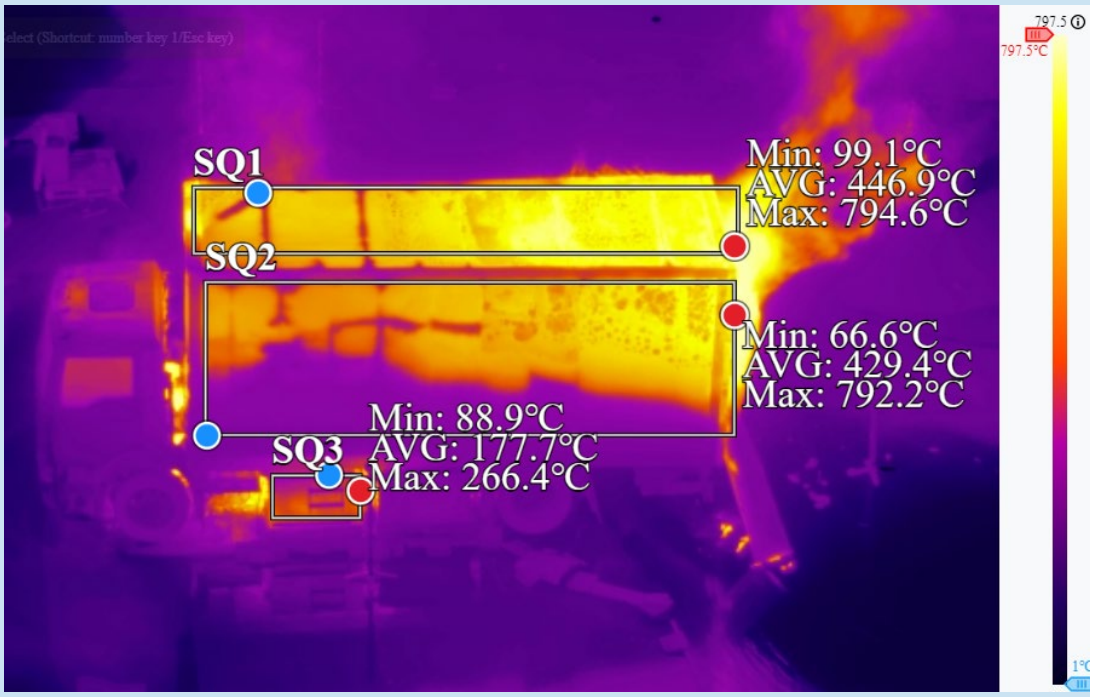
Ongeveer drie kwartier na de start van het praktijkexperiment worden zowel de lading in de laadruimte als delen van de cabine handmatig ontstoken met een gasbrander. Hierdoor ontwikkelt zich geleidelijk een voertuigbrand met toenemende rook- en vlamverschijnselen. Na de ontsteking van de lading ontwikkelt de brand zich gedurende enkele minuten verder en breidt zich uit. Dit gaat gepaard met een steeds sterkere rookontwikkeling. Circa zeven minuten na de ontsteking worden de eerste duidelijke vlamverschijnselen vanuit de laadbak zichtbaar. Op dat moment worden ook de brandweereenheden gealarmeerd.

Gedurende de daaropvolgende ongeveer tien minuten, overeenkomend met de opkomsttijd van de eerste tankautospuit, blijft het voertuig branden. De thermal runaway in het batterij-pakket zorgt daarbij voor aanhoudende vlamvorming rondom de accu's, terwijl de brand zich verder uitbreidt in de laadruimte en cabine. Tegen de tijd dat de eerste brandweereenheden arriveren, is sprake van een volledig ontwikkelde voertuigbrand, waarbij zowel de batterijbrand als de brand in het voertuig duidelijk zichtbaar zijn (Figuur 6.4).



Figuur 6.4 Ontwikkelde voertuig- en ladingbrand met instabiel batterijpakket

Warmtebeeld van de drone bij aankomst van de brandweerploegen



Figuur 6.5 Warmtebeeld op drone bij aankomst brandweerploegen om 11:15 CEST (+1:03 EXP)

In Figuur 6.5 is een warmtebeeld weergegeven van de drone die door Team Digitale Verkenning werd bestuurd. Dit beeld is van 11:15 CEST (+1:03 EXP), het tijdstip dat de voertuig- en ladingbrand was ontwikkeld en de brandweer ter plaatse arriveerde. In de figuur zijn van drie rechthoeken (SQ1, SQ2 en SQ3) de minimum (Min. en de blauwe stip), maximum (Max. en de rode stip) en gemiddelde (AVG) temperatuur weergegeven.

SQ1 is het bovenaanzicht van de truck vanaf de drone en laat de hoogste temperaturen zien; deze zullen echter vanaf de grond niet waarneembaar zijn met een WBC. SQ3 laat temperaturen zien die op de zijwand van de vrachtwagen zijn gemonitord, waarbij duidelijk verhoogde temperaturen waarneembaar zijn.

SQ2 laat de temperaturen op de WBC van het batterijpakket zien. Daarbij is een verhoogde temperatuur waarneembaar op de buitenwand, maar deze ligt wel aanzienlijk lager dan de werkelijke temperatuur binnenin het batterijpakket. Hier wordt in paragraaf 6.2.2. verder op ingegaan.

6.1.3 Bestrijding voertuig- en ladingbrand

Kloktijd (CEST): 11:15:55 tot 11:47:40
Tijd sinds start experiment (EXP): +1:03:25 tot +1:35:10
Duur: 31 min 45 s

Zodra de eerste eenheden ter plaatse zijn, start de eerste offensieve brandweerinzet. Aanvankelijk wordt één lagedrukstraal ingezet, gericht op het voertuig en het batterijpakket. Binnen enkele minuten wordt deze inzet uitgebreid met een tweede lagedrukstraal van dezelfde tankautospuit. Kort daarna volgen twee aanvullende lagedrukstralen van de tweede tankautospuit, zodat tijdens het grootste deel van deze bestrijdingsfase vier lagedrukstralen gelijktijdig worden ingezet (Figuur 6.6).

De brandweerinzet is in deze periode vooral gericht op het beheersen van de brand en het creëren van een veilige uitgangspositie voor de specialistische UHD-inzet. Tijdens de inzet wordt de laadbak geopend met een spreider. Gevolg hiervan is dat delen van de laadbak los raken en het dak van de laadbak gedeeltelijk instabiel wordt.

Ruim twintig minuten na de start van de blussing arriveert het UHD-team bij het voertuig. De ploeg voert een rondomverkenning rondom het voertuig uit, beoordeelt de situatie en bereidt zich voor op de inzet op het batterijpakket.



Figuur 6.6 Bestrijding van voertuig- en ladingbrand

6.1.4 UHD-inzet op batterijpakket

Kloktijd (CEST): 11:47:40 tot 12:59:03
Tijd sinds start experiment (EXP): +1:35:10 tot +2:46:33
Duur: 1 uur 11 min 23 s

In de laatste fase van het experiment wordt een reeks gerichte UHD-inzetten op zowel het batterijpakket als de laadbak gedaan (Figuur 6.7). Eerst wordt een steunplank aangebracht om het UHD-systeem stabiel op het batterijpakket te kunnen positioneren. Vijf minuten later

volgt de eerste UHD-inzet die ongeveer vijf minuten duurt en is gericht op de onderste batterijmodule. Hierbij wordt gedurende meerde minuten stoomvorming uit het batterijpakket waargenomen, wat erop wijst dat warmte effectief aan het batterijpakket wordt onttrokken

In de daaropvolgende twintig minuten worden meerdere UHD-inzetten uitgevoerd op de middelste en onderste batterijmodule. De tweede en derde inzet richten zich op de middelste batterijmodule en duren respectievelijk circa vijf en twee minuten. Bij de derde UHD-inzet, die dus de tweede is op de middelste module, wordt ook stoom waargenomen en later weglekkend water uit het batterijpakket. (In het brandonderzoek in Bijlage 7 wordt hierbij opgemerkt dat de eerste UHD-inzet op de tweede module bovenaan de batterijcellen plaatsvond, waardoor de koeling zeer beperkt is geweest. De temperatuur daalt, op basis van de meetwaarden van de thermokoppels, van enkele honderden graden Celsius tot ongeveer 100 °C. Tegelijkertijd blijkt dat de temperatuur na verloop van tijd weer oploopt in de middelste module.)

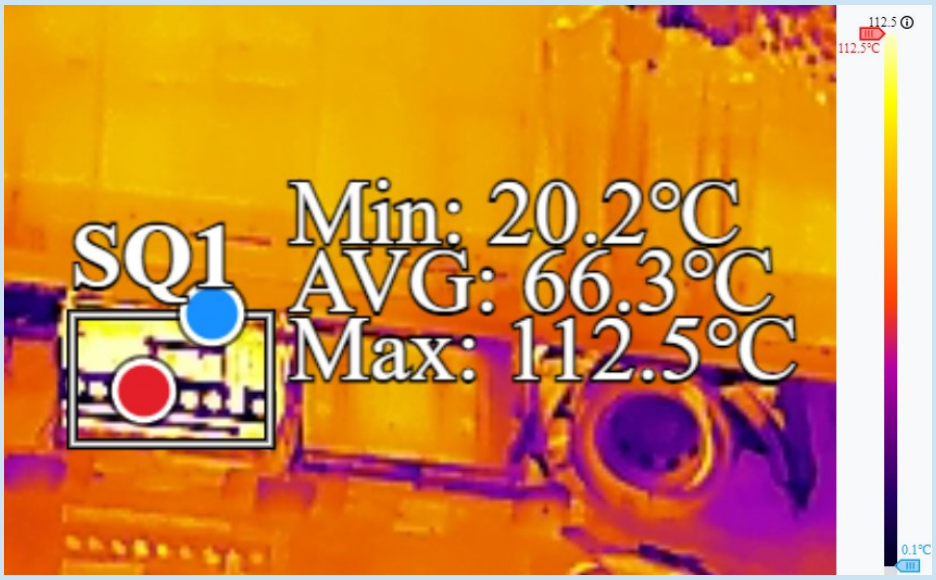
Een halfuur na de eerste UHD-inzet (om 12:31:11 CEST / +2:18:41 EXP) wordt waargenomen dat de brand in de laadbak opnieuw oplaait, waarna het UHD-team zich tijdelijk ook op de laadruimte richt. Twee keer wordt het UHD-blussysteem ingezet op de laadbak. Vervolgens keert de aandacht terug naar het batterijpakket. Daar worden nog drie aanvullende UHD-inzetten uitgevoerd: een vierde op het batterijpakket van de middelste batterijmodule van ongeveer vijf minuten, gevolgd door een vijfde UHD-inzet op het batterijpakket van circa twee minuten op de onderste batterijmodule. Daarmee zijn in totaal vijf UHD-inzetten op het batterijpakket uitgevoerd, waarvan drie op de middelste module en twee op de onderste.



Figuur 6.7 UHD-inzet op batterijpakket

Warmtebeeld van de drone van Team Digitale Verkenning voor en na de UHD-inzetten

In Figuur 6.8 en is het warmtebeeld van het batterijpakket van de drone weergegeven op het tijdstip dat de UHD-inzet werd voorbereid door de UHD-ploeg. Het beeld is gemaakt op het tijdstip 11:48 CEST (+1:35 EXP). Te zien is een verhoogde temperatuur, die aan de onderzijde het hoogste is. In Figuur 5.10 is hetzelfde warmtebeeld weergegeven; hier is echter de temperatuurschaal aangepast en zijn enkel temperaturen vanaf 90 graden Celsius en hoger weergegeven op de schaal (met het programma *DJI Thermal Analysis Tool 3)*. Met deze aangepaste schaalinstellingen wordt beter zichtbaar waar lokaal de meeste verhitting is. In de figuren zijn de laagst gemeten temperatuur (Min. en blauwe stip), hoogst gemeten temperatuur (Max. en rode stip) en gemiddelde (AVG) weergegeven binnen het vierkant SQ1 dat het batterijpakket omsluit.



Figuur 6.8 Warmtebeeld bij gereedmaken UHD-ploeg voor aanvang UHD-inzet op batterijpakket om 11:48 CEST (+1:35 EXP)

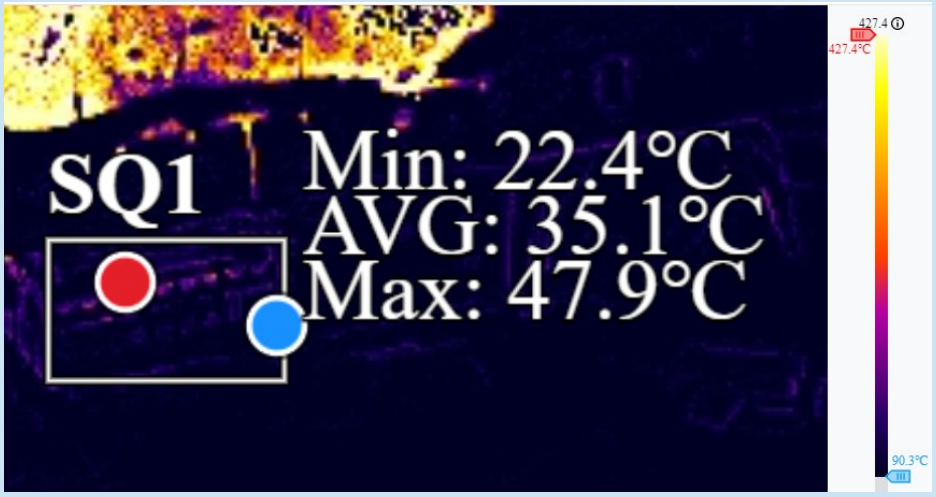


Figuur 6.9 Warmtebeeld bij gereedmaken UHD-ploeg voor aanvang UHD-inzet op batterijpakket om 11:48 CEST (+1:35 EXP) met aangepaste temperatuurschaal

In Figuur 6.10 en Figuur 6.11 is het warmteeeld van de drone weergegeven met respectievelijk de standaardinstellingen en met een aangepaste temperatuurschaal op het tijdstip na de vijf UHD-inzetten op het batterijpakket, namelijk om 12:59 CEST (+2:46 EXP). Hierop is een afname van zowel de hoogst gemeten temperatuur als de gemiddelde temperatuur te zien.



Figuur 6.10 Warmtebeeld bij gereedmaken UHD-ploeg na afloop UHD-inzetten om 12:59 CEST (+2:46 EXP).



Figuur 6.11 Warmtebeeld bij gereedmaken UHD-ploeg na afloop UHD-inzetten om 12:59 CEST (+2:46 EXP) met aangepaste temperatuurschaal

6.1.5 Overzicht van relevante waarnemingen

Samenvattend zijn voor wat betreft brandverloop en verloop van de brandweerinzet de volgende relevante waarnemingen zien:

> Na initiatie door twee schroeven volgt een periode van circa veertien minuten waarin batterijcellen hoorbaar in thermal runaway gaan en batterijgassen vrijkomen, wat wijst op thermische propagatie in de onderste batterijmodule. Nadat twee aanvullende schroeven in dezelfde module zijn ingebracht, nemen de vrijkomende

batterijgassen opnieuw toe en blijven gedurende ongeveer veertien minuten zichtbaar, terwijl batterijcellen hoorbaar blijven openbarsten.

> De vrijkomende batterijgassen worden tweemaal handmatig ontstoken. Na de tweede ontsteking ontwikkelen zich aanhoudende vlamverschijnselen rondom het batterijpakket, die in omvang toenemen als gevolg van de voortgaande thermal runaway.
> Nadat de lading en cabine handmatig zijn ontstoken, ontwikkelt de brand zich binnen ongeveer zeven minuten tot een volledig ontwikkelde vrachtwagenbrand met zichtbare vlamverschijnselen uit de laadbak.
> Bij aankomst van de brandweer zijn nog steeds vlammen rondom het batterijpakket zichtbaar. Tijdens de eerste inzet worden vier lagedrukstralen van twee tankautospuiten ingezet om de voertuigbrand te bestrijden.
> Tijdens de inzet wordt een instabiele laadbak waargenomen, waarover de veiligheidsfunctionaris wordt geïnformeerd.
> Voor de UHD-inzetten worden steunplanken op het batterijpakket aangebracht om het UHD-blussysteem te kunnen monteren.
> Tijdens de eerste en derde UHD-inzet op het batterijpakket, respectievelijk de eerste keer op de onderste, en de tweede keer op middelste module, wordt stoomvorming waargenomen, en later ook weglekkend water.
> Tijdens de bestrijding van het batterijpakket laait de brand in de laadbak opnieuw op. Met name brandend isolatiemateriaal in de wanden van de vrachtwagen hindert hierbij de UHD-inzet, waardoor deze moet worden onderbroken. Vervolgens worden twee UHD-inzetten op de laadbak uitgevoerd.
> Na beheersing van de oplaaiende ladingbrand worden nog twee aanvullende UHD-inzetten van vijf en twee minuten op het batterijpakket uitgevoerd, gericht op respectievelijk de middelste en onderste batterijmodule.

6.2 Temperatuurmetingen in het batterijpakket

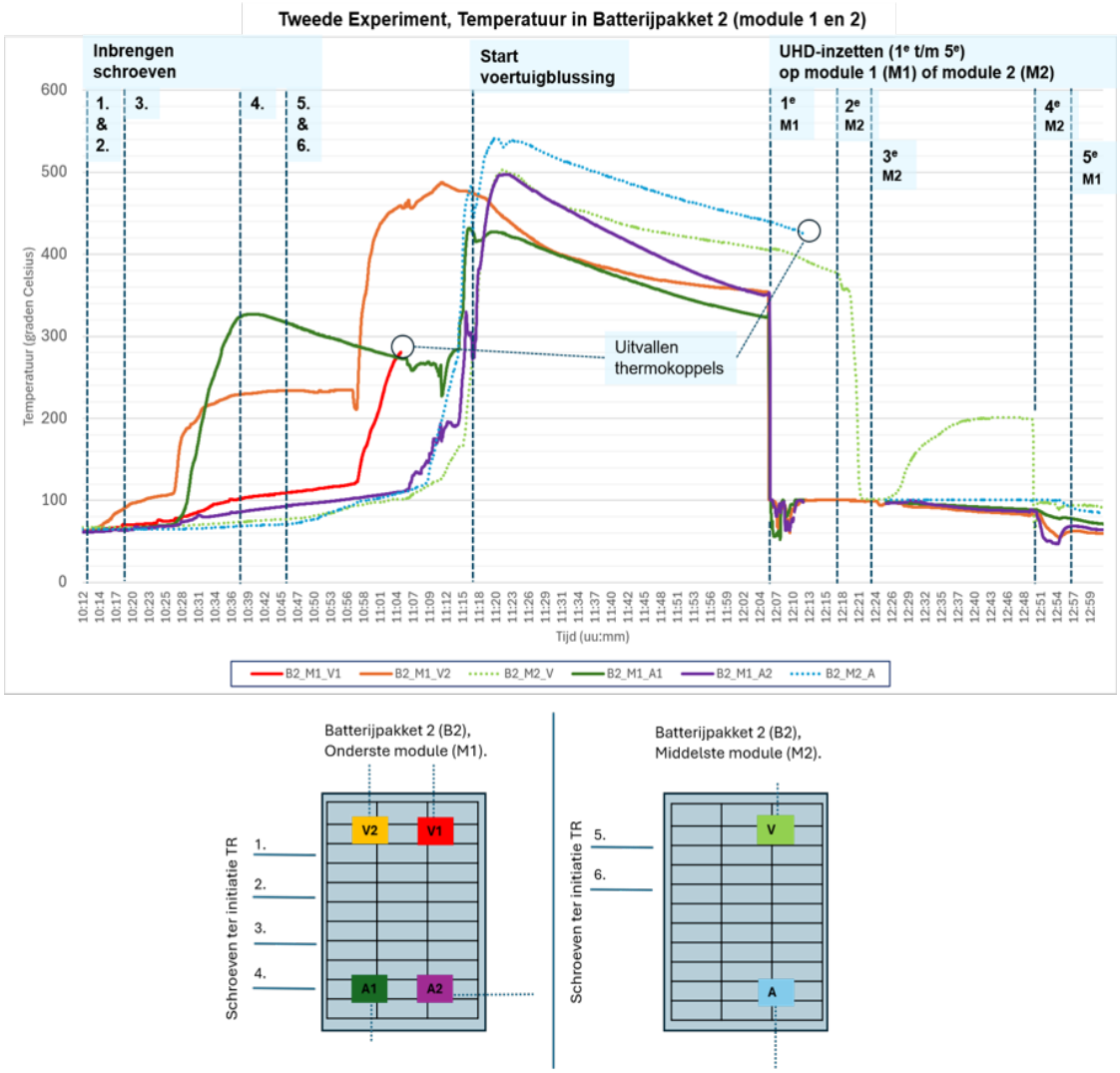
6.2.1 Thermokoppels in het batterijpakket

Zoals beschreven in paragraaf 3.3 zijn tijdens het tweede experiment eveneens temperatuurmetingen uitgevoerd in twee batterijpakketten onder de testvrachtwagen: batterijpakket 2 (B2, chauffeurszijde voor) en batterijpakket 3 (B3, chauffeurszijde achter). Beide batterijpakketten bestonden uit drie modules: een onderste module (M1), een middelste module (M2) en een bovenste module (M3).

Batterijpakket 2, module 1 en module 2

In Figuur 6.12 is het temperatuurverloop weergegeven van de thermokoppels van batterijpakket 2, module 1 en module 2. Module 1 betreft de onderste module waarin de eerste thermal runaway werd geïnitieerd. Deze bevatte 4 thermokoppels (V1, V2, A1 en A2), conform de opstelling beschreven in paragraaf 3.3 en weergegeven onder de grafiek. Module 2 betreft de middelste module, waarin later tijdens het experiment eveneens een thermal runaway werd geïnitieerd. Module 2 bevatte 2 thermokoppels (V en A); deze zijn weergegeven met een gestippelde lichtgroene en gestippelde lichtblauwe lijn.

Met verticaal gestippelde lijnen is aangegeven op welke tijdstippen de thermal runaway is geïnitieerd door de schroeven in te brengen, en de start van de voertuigblussing en de UHD-inzetten plaatsvonden.



Figuur 6.12 Temperatuurmetingen tweede experiment in batterijpakket 2, module 1 en module 2

De grafiek laat zien dat de temperaturen aan het begin van het experiment rond de 65 °C liggen, overeenkomstig de voorverwarmde toestand van het batterijpakket. Na de initiatie van thermal runaway in module 1 treedt een temperatuurstijging op. De thermokoppels in deze module registreren temperaturen tot circa 420 à 500 °C. Hierbij is in de grafiek te zien dat de temperatuur op de thermokoppels die zich dichter bij de schroeven bevinden (B2_M1_V2 en B2_M1_A1) eerder toeneemt, waarna de thermokoppels aan de andere kant van de module (B2_M1_V1 en B2_M1_A2) volgen. Dit wijst erop dat thermische propagatie plaatsvindt binnen de betreffende batterijmodule. Na het bereiken van de piektemperaturen nemen de gemeten temperaturen geleidelijk af, maar blijven gedurende langere tijd boven de 300 °C. Rond 11:16 tot 11:18 is in de metingen van module 2 een abrupte temperatuurstijging zichtbaar. De temperatuur neemt daarbij in korte tijd toe van ongeveer 100 °C naar circa 540 °C.

Rond 12:06 is op alle meetpunten in module 1 van batterijpakket 2 een snelle temperatuur-daling zichtbaar. De temperaturen dalen daarbij binnen één minuut van circa 350 °C naar ongeveer 100 °C. Dit tijdstip komt overeen met de inzet van het UHD-blussysteem. Even later is bij de UHD-inzet op module 2 van batterijpakket 2 ook een temperatuurdaling

zichtbaar, waarbij binnen vijf minuten de temperatuur eveneens afneemt van circa 350 °C naar ongeveer 100 °C.

Na de temperatuurdaling stabiliseren de temperaturen zich rond 90 à 100 °C. Eén meetpunt in module 2 laat vervolgens tussen circa 12:25 en 12:45 opnieuw een temperatuurstijging zien tot ongeveer 200 °C, waarna de temperatuur weer afneemt na de vierde UHD-inzet die gericht was op deze module. De overige meetpunten blijven gedurende deze periode relatief stabiel. Aan het einde van het experiment liggen alle gemeten temperaturen tussen ongeveer 60 en 100 °C.

Batterijpakket 2, module 3 (geen thermal runaway)
In Bijlage 9 is te zien dat de temperatuur in de bovenste module 3 die zich bevond boven twee in thermal runaway zijnde batterijmodules circa 40 °C in temperatuur toeneemt tot een hoogst gemeten temperatuur van 105 °C gedurende het experiment. De temperatuur aan het begin van het experiment was circa 65 °C, omdat de modules tot die temperatuur waren voorverwarmd.

Batterijpakket 4, module 1, 2 en 3 (geen thermal runaway)
De temperatuurmetingen van het naastliggende batterijpakket 3 in Bijlage 9 laten zien dat een temperatuurstijging van ten hoogste 10 °C tot een hoogst gemeten temperatuur van 75 °C zichtbaar is.

Samenvattend laten de resultaten van het tweede experiment voor wat betreft de temperatuurmetingen het volgende zien:

- Direct na het inbrengen van het UHD-blussysteem in het de onderste module in thermal runaway daalt de inwendige temperatuur naar circa 100 °C.
- Na inzet van het UHD-blussysteem stabiliseert de inwendige temperatuur in de gepenetreerde module aanvankelijk gedurende circa 15 minuten rond 100 °C, waarna ze in de laatste 30 minuten geleidelijk afneemt tot circa 70 °C.
- In module 2 die ook in thermal runaway was gebracht, wordt eveneens na inzet van het UHD-blussysteem een daling waargenomen van de inwendige temperatuur naar circa 100 °C. De temperatuur in de tweede module loopt echter in het kwartier na de eerste UHD-inzet weer op naar 200 °C, en daalt na een tweede UHD-inzet tot circa 100 °C, waarna deze in de volgende 15 minuten afneemt tot circa 90 °C.
- In de module waar geen thermal runaway is geïnitieerd, maar die zich wel in hetzelfde batterijpakket als de modules in thermal runaway bevond, wordt een temperatuurtoename van maximaal circa 40 °C waargenomen tot een hoogst gemeten temperatuur van 105 °C.
- In het naastgelegen batterijpakket waarin geen thermal runaway was geïnitieerd en geen UHD-inzet plaatsvond, wordt een temperatuurverhoging van ten hoogste 10 °C waargenomen tot een hoogst gemeten temperatuur van 75 °C.

6.2.2 Warmtebeeldcamera aan de buitenzijde van het batterijpakket en vergelijking met thermkoppels aan de binnenzijde

Figuur 6.13 en Figuur 6.14 presenteren de interne temperaturen van de batterijmodules, gemeten met thermokoppels, en de weergegeven oppervlaktetemperaturen die tijdens de brandweerinzet zijn vastgesteld met WBC's.[21] De warmtebeeldmetingen zijn zowel

[21] Temperatuurmetingen met een WBC zijn indicatief en kunnen een aanzienlijke afwijking hebben van de werkelijke temperatuur.

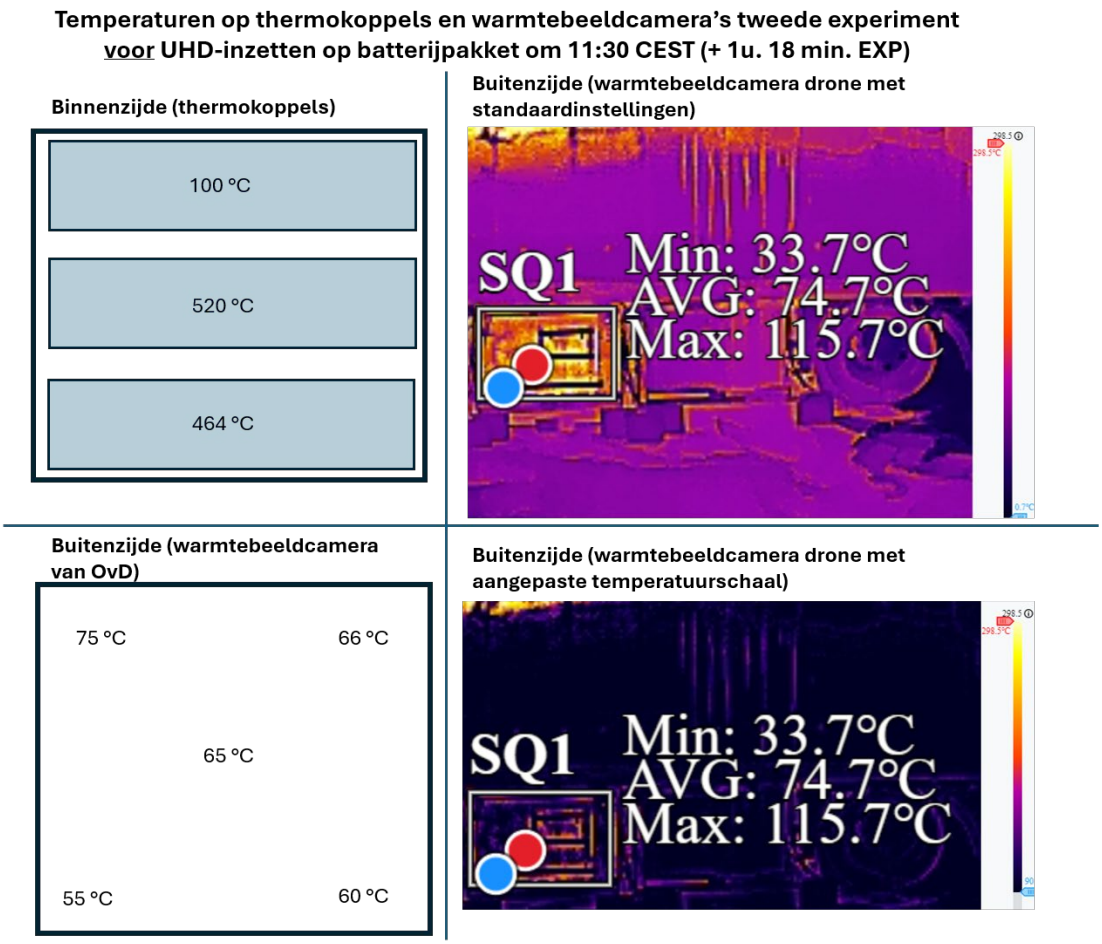
uitgevoerd door de Officier van Dienst vanaf de grond, als met behulp van een drone. Hierdoor kon het batterijpakket vanuit verschillende perspectieven thermisch worden beoordeeld vóór en na de UHD-inzetten.

Voorafgaand aan de UHD-inzetten bevonden de onderste en middelste module zich in thermal runaway. De thermokoppels registreerden hierbij temperaturen van respectievelijk 464 °C en 520 °C, terwijl de bovenste module een temperatuur van circa 100 °C bereikte. Op hetzelfde moment werd aan de buitenzijde van het batterijpakket door de WBC een gemiddelde temperatuur van 74,7 °C en een maximale temperatuur van 115,7 °C waargenomen. Zowel de beelden van de Officier van Dienst als de dronebeelden lieten verhoogde oppervlaktetemperaturen zien, maar deze bleven aanzienlijk lager dan de temperaturen die intern in de batterijmodules aanwezig waren.

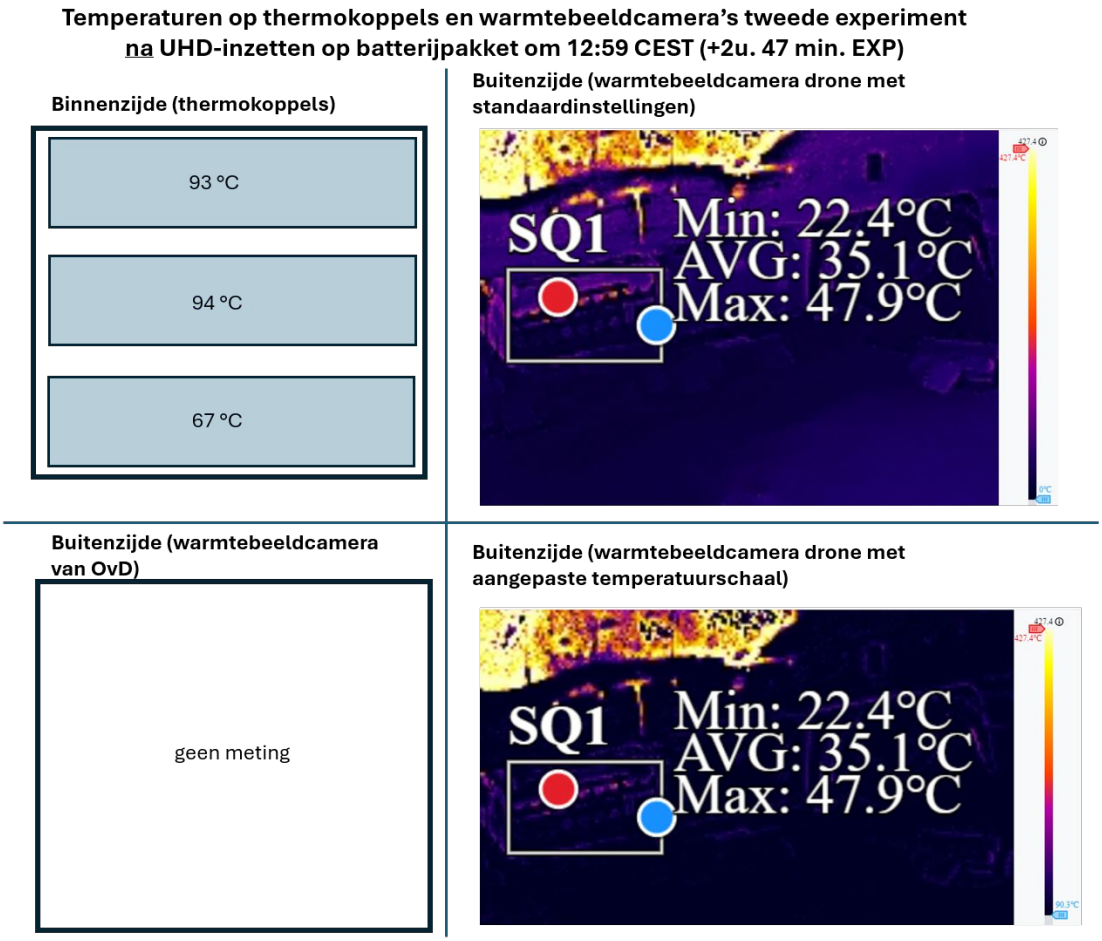
Uit de dronebeelden blijkt dat de thermisch meest actieve delen van het batterijpakket in beperkte mate zichtbaar zijn, hoewel dat zicht wordt beperkt door de metalen strips van de initiatieschroeven die waren aangebracht. De temperatuurindicaties van de WBC van de Officier van Dienst laten niet zien in welk deel van het batterijpakket de inwendige temperatuur het hoogst is.

Na de UHD-inzetten was zowel in de thermokoppelmetingen als in de warmtebeeldbeelden een duidelijke afname van de temperatuur zichtbaar. De intern gemeten temperaturen daalden naar respectievelijk 67 °C, 94 °C en 93 °C. Tegelijkertijd daalde de maximale oppervlaktetemperatuur die met de WBC werd waargenomen van 115,7 °C naar 47,9 °C, terwijl de gemiddelde temperatuur afnam van 74,7 °C naar 35,1 °C. Ook op de dronebeelden is zichtbaar dat de warme zones op en rondom het batterijpakket na de UHD-inzetten sterk zijn afgenomen.

De vergelijking tussen de thermokoppels, de warmtebeeldmetingen van de Officier van Dienst en de dronebeelden laat zien dat de UHD-inzetten resulteerden in een substantiële afkoeling van het batterijpakket. Tegelijkertijd blijkt dat de aan de buitenzijde gemeten temperaturen gedurende het gehele experiment aanzienlijk lager waren dan de temperaturen in de batterijmodules zelf, waardoor de ernst van de interne thermische processen slechts beperkt uit warmtebeeldmetingen aan de buitenzijde kan worden afgeleid.



Figuur 6.13 Temperaturen op thermokoppels in vergelijking met indicatie op WBC voor de UHD-inzetten bij het tweede experiment



Figuur 6.14 Temperaturen op thermokoppels in vergelijking met indicatie op WBC na de UHD-inzetten bij het tweede experiment

6.3 Brandonderzoek batterijpakket na afloop van het experiment

In bijlage 7 van dit rapport is het verslag met fotomateriaal van de uitgebrande batterijpakketten opgenomen van Team Brandonderzoek. Dit verslag is gezamenlijk opgesteld door twee TBO'ers van Veiligheidsregio Haaglanden en Veiligheidsregio Utrecht . Als conclusie van dit verslag is na afloop van het tweede experiment het volgende vastgesteld:

Batterijpakket 2, Chauffeurszijde Voor

> Module 1 (onder). Alle batterijcellen in module 1 zijn volledig uitgebrand.
> Module 2 (midden. Alle batterijcellen in module 2 zijn volledig uitgebrand.
> Module 3 (boven). Alle batterijcellen in module 3 zijn intact gebleven. Wel was er duidelijke smeltschade aan de plastic kap van de module zichtbaar.

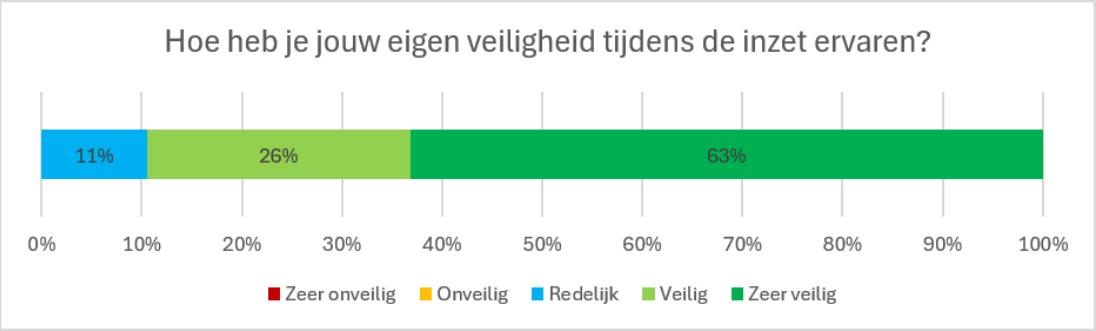
Batterijpakket 3, Chauffeurszijde Achter

> Module 1 (onder): Alle batterijcellen zijn volledig intact gebleven.
> Module 2 (midden): Alle batterijcellen zijn volledig intact gebleven.
> Module 3 (boven): Alle batterijcellen zijn volledig intact gebleven, met lichte smeltschade aan de plastic behuizing van de module.

6.4 Vragenlijsten en groepsinterviews

In deze paragraaf worden de uitkomsten van de vragenlijsten en groepsinterviews gegeven van het tweede experimenten. Bij alle vragen geldt dat 19 onderzoeksdeelnemers (N) de vragenlijst hebben ingevuld.

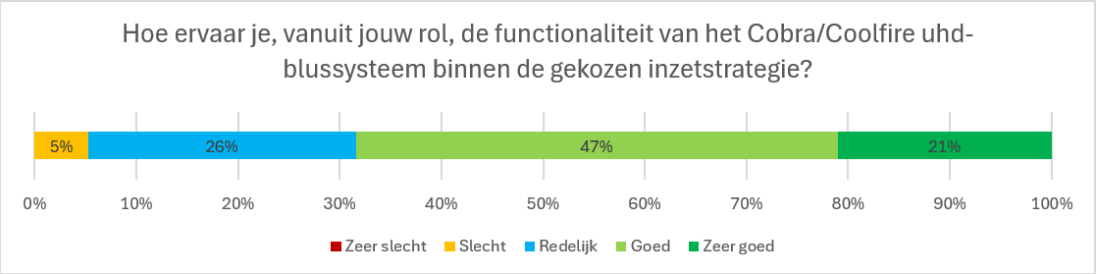
6.4.1 Ervaren veiligheid



Figuur 6.15 Ervaren veiligheid tijdens de inzet

De drie ingezette brandweerploegen hebben de inzet overwegend als veilig ervaren. De veiligheid werd geborgd door vooraf gemaakte werkafspraken, aangewezen veiligheids-functionarissen, persoonlijke beschermingsmiddelen, monitoring en het werken met veiligheidsafstanden. Ook werden risico's, zoals het mogelijk wegschieten van het UHD-systeem, fakkels en de instabiliteit van het dak en de lading, actief bewaakt. De combinatie van maatregelen zorgde volgens de deelnemers voor een rustige en beheerste inzet.

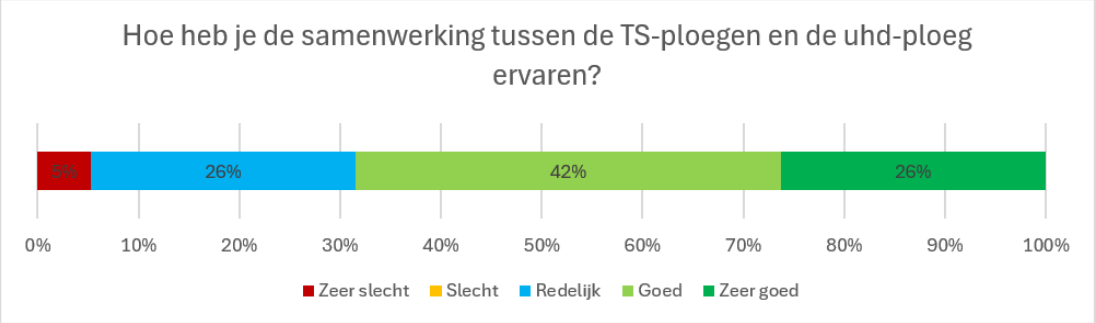
6.4.2 Functionaliteit UHD-blussysteem



Figuur 6.16 Functionaliteit van het UHD-blussysteem

De drie brandweerploegen zien de inzet van het UHD-blussysteem als een redelijk tot (zeer) goede methode voor het blussen van batterijpakketten van e-trucks. Tijdens de inzet nam de temperatuur af, net als rook en vervolgens stoom. Wel gaf men aan dat de daadwerkelijke effectiviteit echter moeilijk was vast te stellen. Door de constructie van het batterijpakket konden hotspots en de locatie van de thermal runaway lastig worden bepaald. Metingen met WBC's boden inzicht in het temperatuurverloop, maar gaven onvoldoende informatie over de daadwerkelijke temperatuur in het accupakket.

6.4.3 Samenwerking TS-ploegen en UHD-ploeg



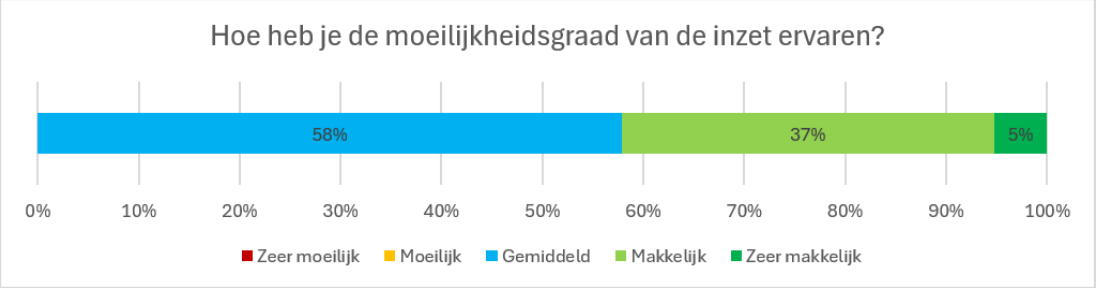
Figuur 6.17 Samenwerking tussen TS-ploegen en UHD-ploeg

De ervaren samenwerking tussen de TS-ploegen en UHD-ploeg vertoont, op basis van de vragenlijst, een wisselend beeld. Circa twee derde van de deelnemers heeft de samenwerking als ‘goed’ of ‘zeer goed’ ervaren. Circa een derde heeft deze als ‘redelijk’ of ‘(zeer) slecht’ ervaren.

Op basis van de verdiepende gesprekken zien we dat er tijdens de inzet onvoldoende afstemming was tussen de TS’en en de UHD-eenheid. Terwijl bevelvoerders en Officieren van Dienst aangaven dat de onderlinge afstemming goed verliep, waren manschappen minder positief over de afstemming binnen de uitvoerende ploegen. Een voorbeeld wat genoemd wordt is dat de manschappen van TS 2 onder leiding van de ‘120’ klaar stonden om met lage druk een inzet te doen op de lading, terwijl de bevelvoerder van het UHD-team, de ‘130’, juist hier het UHD-blussysteem op ging inzetten.

Daarnaast hebben de deelnemende TS’en ervaren dat manschappen van de UHD-eenheid “zich als bevelvoerders gedroegen”, terwijl de achterliggende intentie van de manschappen van de UHD-eenheid was om ondersteuning te bieden. Andersom ervoer het UHD-team namelijk dat de manschappen van de TS’en zich niet altijd aan het inzetplan hielden en daardoor bijsturing nodig hadden. Ook gaf de UHD-ploeg aan dat zij het gevoel had enkele taken bij TS’en te hebben neergelegd, zoals de back-up straal, terwijl zij deze ook zelf zou kunnen hanteren (door de ‘133’ en ‘134’ van de UHD-ploeg).

6.4.4 Moeilijkheidsgraad



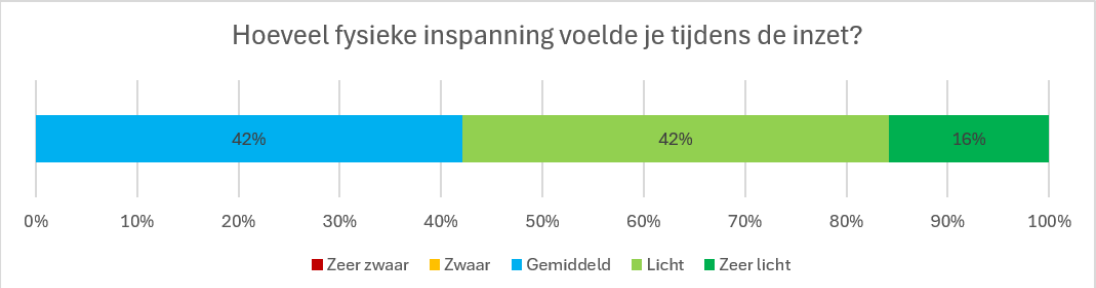
Figuur 6.18 Ervaren moeilijkheidsgraad van de inzet

De drie brandweerploegen beoordeelden de moeilijkheidsgraad van de inzet als gemiddeld tot (zeer) makkelijk. Alle vier de OvD's en bevelvoerders beoordeelden de inzet als ‘gemiddeld’, tegenover vijf van de twaalf manschappen; zeven manschappen vonden de inzet ‘makkelijk’ of ‘zeer makkelijk’. In de groepsinterviews werd aangegeven dat de complexiteit voor de leidinggevenden vooral lag in het balanceren tussen het waarborgen van een veilige werkomgeving voor de UHD-inzet en het bestrijden van de brand in de lading. Voor de manschappen lag de grootste uitdaging in de beperkte bereikbaarheid van de brandhaard door de lading en de aanwezige isolatie. Deze uitdagingen hielden geen direct verband met de thermal runaway in het batterijpakket.

De inzet van zes personen door het UHD-team werd als belangrijke randvoorwaarde genoemd voor het uitvoeren van een UHD-blussing op een batterijpakket. Een team met vier personen werd onwenselijk geacht, omdat dan onvoldoende capaciteit beschikbaar zou zijn voor veiligheidswaarneming en ondersteuning.

De lastig te openen laadklep en onduidelijkheid over de prioriteiten tussen de accu en de lading bemoeilijkten voor een aantal deelnemers de inzet. Het eerder openen of verwijderen van delen van het voertuig en het gebruik van hulpmiddelen zoals een fognail op de lading hadden de brandbestrijding in ogen van de deelnemende TS’en waarschijnlijk eenvoudiger en effectiever gemaakt. Ook het openen van de zijkant en het inzetten van schuim werden als mogelijke verbeteringen genoemd voor bestrijding van de lading.

6.4.5 Fysieke inspanning



Figuur 6.19 Ervaren fysieke inspanning

De deelnemende ploegen geven aan de fysieke inspanning te ervaren hebben als gemiddeld tot (zeer) licht. Wel is de inzet als lang ervaren, maar dat leverde geen fysieke ongemakken op, zoals werd aangegeven in de groepsinterviews.

7 Analyse van de meetresultaten

In dit hoofdstuk worden, op basis van de meetresultaten uit hoofdstuk 5 en 6, de veiligheid, effectiviteit en praktische toepasbaarheid van de UHD-inzet bij batterijpakketten van elektrische vrachtwagens geanalyseerd. Dit wordt gedaan aan de hand van de in hoofdstuk 1 genoemde indicatoren V1 t/m V6, E1 t/m E6 en P1 t/m P5. Op basis van deze analyse worden de onderzoeksvragen beantwoord en wordt bepaald in hoeverre het UHD-blussysteem door de Nederlandse brandweer veilig, effectief en praktisch toepasbaar kan worden ingezet op (instabiele) batterijpakketten van elektrische vrachtwagens.

7.1 Veiligheid

7.1.1 Fakkels vanuit het batterijpakket en vlamverschijnselen (V1)

Het risico op blootstelling aan vlammen en fakkels bleek met de gekozen werkwijze beheersbaar. De UHD-bediener stond gedurende de inzet onder dekking van ten minste twee lagedrukstralen. Eén lagedrukstraal diende als afscherming tussen het batterijpakket en de UHD-bediener, terwijl de tweede lagedrukstraal afscherming bood van mogelijke effecten vanuit het batterijpakket naar drukhoudende voertuigonderdelen en andere batterijpakketten.

Hoewel in de risicoanalyse uit hoofdstuk 4 aanvankelijk de inzet van drie lagedrukstralen was voorzien, namelijk één ter dekking van de UHD-bediener, een tweede voor afscherming richting een naastgelegen batterijpakket en een derde ter bescherming tegen drukhoudende voertuigonderdelen, bleek tijdens de inzet dat de vlamverschijnselen vanuit het batterijpakket niet van zodanige lengte en intensiteit waren dat zij direct tot brandoverslag konden leiden. Daarom is besloten dat minimaal twee lagedrukstralen als noodzakelijke dekking kunnen worden beschouwd: een ter bescherming van de UHD-bediener en een tweede tegen plotselinge fakkels in de richting van andere voertuigonderdelen. De derde lagedrukstraal kan dan als back-up worden ingezet.

De UHD-inzetten zijn uitgevoerd nadat de voertuig- en ladingbrand grotendeels onder controle waren gebracht. Tijdens het tweede experiment laaide de ladingbrand echter opnieuw op door brandend isolatiemateriaal, waardoor de UHD-inzet tijdelijk moest worden onderbroken. Dit onderstreept het belang van voortdurende monitoring van de totale brandsituatie. Daarnaast laat het zien dat in bepaalde situaties het onderbreken van de inzet of het terugtrekken van de UHD-bediener noodzakelijk kan zijn, ongeacht de aanwezige dekking met lagedrukstralen. Onder de omstandigheden van het experiment was in de omgeving voldoende ruimte beschikbaar om twee lagedrukstralen in te zetten als dekking.

Daarnaast droeg het gebruik van een lange lans of lans met verlengstuk op het UHD-blussysteem bij aan een veilige inzet, zodat een minimale lanslengte van 130 cm werd bereikt. Daarmee is afstand gecreëerd tussen het batterijpakket en de UHD-bediener.

Het risico op blootstelling van de UHD-bediener aan fakkels en vlamverschijnselen is zodoende te beheersen wanneer de inzet plaatsvindt onder dekking van minimaal twee lagedrukstralen en gewerkt wordt met een lanslengte van ten minste 130 cm.

7.1.2 Explosies van gassen afkomstig van de thermal runaway in de batterij (V2)

In beide experimenten waren in de beginfase batterijgassen aanwezig zonder dat daarbij een ontsteking plaatsvond. In beide gevallen bleek een externe ontstekingsbron noodzakelijk om de batterijgassen te ontsteken en daarmee de batterijbrand te bevorderen en het explosierisico weg te nemen. In het eerste experiment was de gemonteerde bougie toereikend voor ontsteking. In het tweede experiment werden de vrijkomende gassen handmatig met een gasbrander ontstoken, omdat zij de bougie onvoldoende bereikten.

Dat handmatige ontsteking noodzakelijk was, benadrukt dat ontsteking van de gassen bij een LFP-batterij niet vanzelfsprekend plaatsvindt en veiligheidsmaatregelen omtrent het explosierisico noodzakelijk zijn. Hoewel zich tijdens de experimenten geen situaties voordeden waarin gassen zich konden ophopen, blijft het ventileren van batterijgassen een belangrijke veiligheidsmaatregel, in het bijzonder in (semi-)besloten ruimtes. Bij een grote uitstroom van gassen (of hevige steekvlammen) kan het bovendien noodzakelijk zijn tijdelijk afstand te nemen tot de situatie weer als veilig genoeg wordt beoordeeld.

Onder de omstandigheden van de experimenten bleek het risico op explosies van batterijgassen beheersbaar, waarbij ventilatie en het voorkomen van gasophoping belangrijke randvoorwaarden vormen.

7.1.3 Fysische explosies van drukhoudende voertuigonderdelen (V3)

Er zijn geen explosies van voertuigbanden of andere drukhoudende voertuigonderdelen waargenomen. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat de banden vooraf drukloos waren gemaakt. Omdat banden bij een daadwerkelijk incident doorgaans niet drukloos zijn, blijft de veiligheidsmaatregel om deze onderdelen op temperatuur te monitoren en bij daadwerkelijke of vermoedelijke blootstelling aan hitte zo nodig te koelen, onverminderd van belang. Daarbij vormt de beschikbaarheid van gereedstaande lagedrukstralen, zoals beschreven in de vorige paragraaf, een noodzakelijke veiligheidsmaatregel.

7.1.4 Het vrijkomen van toxische gassen (V4)

In beide experimenten kwamen gedurende langere tijd batterijgassen en rook vrij, vanaf het moment dat de thermal runaway begon tot tijdens de voertuig- en ladingbrand. Hierbij werden geen bijzonderheden waargenomen. De gebruikelijke veiligheidsmaatregelen voor blootstelling aan rook en gevaarlijke gassen bleken afdoende en gedurende de volledige inzet noodzakelijk. Hierbij gaat het onder meer om het dragen van persoonlijke beschermingsmiddelen en ademlucht, het beperken van de blootstellingsduur, het werken bovenwinds en buiten de rookpluim en het toepassen van ventilatie om (rook)gassen bij brandweermensen weg te blazen. Ook het toepassen van de juiste maatregelen omtrent arbeidshygiëne is van belang. Hiermee zijn risico's als gevolg van toxische gassen beheersbaar.

7.1.5 Elektrocutierisico (V5)

Tijdens beide experimenten zijn geen aanwijzingen gevonden voor relevante elektrocutierisico's. Daarbij draagt het zwevende elektriciteitsnet eraan bij dat het elektrocutierisico

onder de omstandigheden van de UHD-inzet minimaal is (Brandweeracademie, 2020; Hessels & Brans, 2024). Wel blijft het van belang dat de UHD-bediener direct contact met metalen onderdelen van het UHD-blussysteem vermijdt en dat eventuele laadvoorzieningen vooraf veilig worden uitgeschakeld of losgekoppeld.[22] Op basis van de observaties zijn geen aanwijzingen gevonden dat aanvullende veiligheidsmaatregelen noodzakelijk zijn. Het elektrocutierisico blijkt dus beheersbaar.

7.1.6 Werkomgeving (V6)

Uit de audiovisuele waarnemingen blijkt dat geen van de fysieke risico's die samenhangen met een elektrische vrachtwagenbrand heeft geleid tot letsel of zichtbare (bijna-)blootstelling van brandweerpersoneel. Daarbij blijft het van belang dat bij alle werkzaamheden, ook wanneer deze buiten het reguliere inzetprotocol vallen, zoals het monteren van steunplanken op het batterijpakket[23], voortdurend aandacht wordt besteed aan de voorgeschreven veiligheidsmaatregelen.

Daarnaast bleek tijdens het tweede experiment dat delen van de laadbak constructief instabiel werden. Dit onderstreept dat niet alleen het batterijpakket, maar ook een instabiele voertuigconstructie en mogelijk omvallende lading een veiligheidsrisico kunnen vormen voor de UHD-bediener die dicht bij de vrachtwagen de UHD-inzet uitvoert. De waarnemingen benadrukken het belang van continue monitoring van de gehele incidentlocatie. Daarbij dient niet alleen het batterijpakket te worden geobserveerd, maar ook andere voertuigonderdelen op aanstraling en opwarming, drukhoudende voertuigonderdelen op temperatuurverhoging en het voertuig en de lading op het oplaaien van brandhaarden, constructieve instabiliteit en mogelijk omvallende delen. Deze waarnemingen tonen het belang van een goed overzicht van de werkomgeving als randvoorwaarde voor een veilige inzet. Een volledige rondomverkenning voorafgaand aan zowel de reguliere brandbestrijding, als gedurende de UHD-inzet wordt daarbij aanbevolen, evenals voortdurende monitoring van de situatie en bewustzijn van veiligheidsrisico's tijdens de inzet.

Aanvullende beheersmaatregelen en aandachtspunten bij de UHD-inzet
In Bijlage 10 is een overzicht opgenomen waarin wordt gereflecteerd op alle beheersmaatregelen en aandachtspunten die in de expertsessie uit hoofdstuk 4 voorafgaand aan de praktijkexperimenten waren opgesteld. Diverse scenario's waarvoor in de expertsessie aanvullende beheersmaatregelen waren voorzien, deden zich tijdens de experimenten niet voor. Het betreft dan met name maatregelen die zijn bedoeld voor situaties met aanzienlijke uitstroom van batterijgassen, omvangrijke vlamverschijnselen, hoge warmtestralingsniveaus, onvoldoende overzicht van de incidentontwikkeling of andere omstandigheden die kunnen leiden tot een verhoogd risico voor het brandweerpersoneel. Omdat dergelijke omstandigheden zich tijdens de experimenten niet voordeden, hoefden maatregelen zoals het terugtrekken van personeel, defensief optreden of het afzien van een UHD-inzet niet te worden toegepast. Voor praktijkincidenten blijven deze maatregelen echter relevant, aangezien er sprake kan zijn van een minder voorspelbaar incidentverloop en grotere onzekerheid over de aanwezige risico's.

[22] In Hessels & Brans (2024) wordt toegelicht dat ook bij het onbedoeld aanraken van metalen delen van het UHD-blussysteem niet direct sprake is van blootstelling aan een potentieel gevaarlijke spanning, omdat het risico op het ontstaan van een gesloten stroomkring nihil is. Daarmee is feitelijk sprake van een dubbele bescherming tegen elektrocutie. Desondanks blijft het aanbevelenswaardig om contact met metalen onderdelen zoveel mogelijk te vermijden, zodat deze extra veiligheidsbarrière behouden blijft.

[23] Dit is uitgevoerd bij het tweede experiment, waarbij de Coolfire is toegepast. De Coolfire heeft een andere spuitmond dan het UHD-blussysteem van Coldcut Systems, waarbij door het UHD-team op de tweede dag is overwogen om de grip op het batterijpakket met steunplanken te bevorderen.

7.1.7 Antwoord op de onderzoeksvragen

Samenvattend laten beide experimenten zien dat de vooraf vastgestelde veiligheidsmaatregelen hebben bijgedragen aan een veilige uitvoering van de UHD-inzet en onder de omstandigheden van het experiment uitvoerbaar zijn gebleken. Tabel 7.1 geeft een overzicht van de resultaten per veiligheidsindicator.

Tabel 7.1 Samenvatting veiligheidsindicatoren

#	Indicator	Onderzoeksresultaat
V1	Fakkels vanuit het batterijpakket en vlamverschijnselen	De experimenten laten zien dat blootstelling van brandweerpersoneel aan fakkels en vlamverschijnselen uit het batterijpakket kan worden voorkomen door de UHD-inzet uit te voeren onder afscherming van ten minste twee lagedrukstralen en voldoende afstand tot het batterijpakket te bewaren door het hanteren van een minimale UHD-lanslengte van 130 cm.
V2	Explosies van gassen afkomstig van de thermal runaway in de batterij	Explosierisico's van batterijgassen kunnen worden beperkt door gasophoping te voorkomen met voldoende ventilatie. Brandweermensen dienen gebieden met mogelijk gevaarlijke gasconcentraties te vermijden en zo nodig tijdelijk afstand te nemen.
V3	Fysische explosies van drukhoudende voertuigonderdelen	Het risico op fysische explosies van drukhoudende voertuigonderdelen kan worden beperkt door deze onderdelen te monitoren op opwarming en zo nodig te koelen.
V4	Het vrijkomen van toxische gassen	Blootstelling aan rook en gassen kan worden beperkt door het dragen van PBM inclusief ademlucht, het beperken van de blootstellingsduur, bovenwinds werken en het toepassen van ventilatie.
V5	Elektrocutierisico	De aanwezigheid van een zwevend elektriciteitsnet minimaliseert het elektrocutierisico. Het vermijden van direct contact met metalen onderdelen van het UHD-blussysteem vormt daarbij een aanvullende barrière.
V6	Onveilige werkomgeving	Een veilige UHD-inzet vereist voortdurend overzicht van de situatie en actieve monitoring van het batterijpakket, de voertuigconstructie, de lading en overige omgevingsrisico's.

Op basis van deze resultaten kunnen de onderzoeksvragen met betrekking tot de veiligheid van de UHD-inzet als volgt worden beantwoord.

1. **Hoe kan worden voorkomen dat brandweerpersoneel wordt blootgesteld aan vlammen en fakkels tijdens de UHD-inzet?**

De experimenten laten zien dat blootstelling van brandweerpersoneel aan vlammen en fakkels kan worden voorkomen door de UHD-inzet pas te starten nadat de voertuig- en ladingbrand is bestreden. Daarnaast is het van belang dat de UHD-bediener tijdens de UHD-

inzet wordt beschermd door ten minste twee lagedrukstralen: één beschermende lagedrukstraal tussen het batterijpakket en de bediener en een tweede en waar nodig derde lagedrukstraal gericht op de afscherming van overige batterijpakketten en drukhoudende voertuigonderdelen, zoals banden. Ook draagt een lange lans of een lans met verlengstuk, zodat een minimale lanslengte van 130 cm wordt bereikt, bij aan een grotere afstand tot het batterijpakket en daarmee aan een veiliger inzet.

2. **Hoe kan worden voorkomen dat brandweerpersoneel wordt blootgesteld aan explosies van batterijgassen en drukhouders van de vrachtwagen tijdens de UHD-inzet?**

Blootstelling aan explosieve effecten van batterijgassen en vrachtwagenbanden kan worden beperkt door batterijgassen te ventileren, vrachtwagenbanden en andere drukhoudende voertuigonderdelen te monitoren op opwarming en deze waar nodig te koelen. Bij een grote uitstroom of mogelijke ophoping van batterijgassen kan het noodzakelijk zijn om tijdelijk afstand te nemen.

3. **Hoe kan worden voorkomen dat brandweerpersoneel wordt blootgesteld aan toxische gassen tijdens de UHD-inzet?**

Blootstelling kan voldoende worden beperkt door het dragen van persoonlijke beschermingsmiddelen inclusief ademlucht. Daarnaast is het van belang de blootstellingsduur zo kort mogelijk te houden, zoveel mogelijk bovenwinds en buiten de rookpluim te werken en ventilatie toe te passen om rook en gassen uit het werkgebied af te voeren.

4. **Hoe kan worden voorkomen dat brandweerpersoneel wordt blootgesteld aan elektrocutierisico's tijdens de UHD-inzet?**

De aanwezigheid van een zwevend elektriciteitsnet vormt een belangrijke beperking van het elektrocutierisico onder de omstandigheden van de UHD-inzet. Daarnaast dient contact met metalen onderdelen van het UHD-blussysteem te worden voorkomen en moet het voertuig, indien van toepassing, veilig van de laadvoorziening worden losgekoppeld.

7.2 Effectiviteit

7.2.1 Het temperatuurverloop binnen de batterij (E1)

Batterijmodules in thermal runaway

De temperatuurmetingen uit hoofdstuk 5 en 6 laten zien dat inzet van het UHD-blussysteem op de batterijmodule die zich in thermal runaway bevindt, leidt tot een snelle verlaging van de inwendige temperatuur. In beide experimenten daalde de temperatuur in de batterijmodule waarin thermal runaway plaatsvond binnen één tot vijf minuten na het inbrengen van het UHD-blussysteem van circa 500 °C naar ongeveer 100 °C. Vervolgens bleef de temperatuur gedurende circa 15 tot 20 minuten op dit niveau. Aan het einde van de experimenten varieerden de gemeten temperaturen in het batterijpakket tussen 70 °C en 100 °C, hetgeen erop wijst dat de modules na verloop van tijd aan de omgevingslucht geleidelijk verder afkoelen.

Uit het tweede experiment blijkt daarnaast dat inzet van het UHD-blussysteem op de onderste module niet leidde tot een duidelijke temperatuurverlaging van de middelste module waarin ook thermal runaway plaatsvond. Dit wijst erop dat het 'raken' van de juiste module door het UHD-blussysteem een noodzakelijke voorwaarde is om een temperatuur-verlagend effect te bereiken.

Niet-betrokken batterijmodules
In de modules waarin geen thermal runaway was geïnitieerd, maar die zich wel bevonden in een batterijpakket waarin andere module(s) in thermal runaway waren geraakt, werden temperaturen gemeten tot maximaal 80 °C in het eerste experiment en 105 °C in het tweede experiment. Dit betekent een temperatuurstijging van ongeveer 20 °C tot 40 °C ten opzichte van de start van het experiment, aangezien alle batterijmodules vooraf waren voorverwarmd tot circa 60 °C en 65 °C.

Fysische beschouwing
De snelle temperatuurdaling tot circa 100 °C is fysisch goed te verklaren door de hoge warmteont-trekking tijdens de faseovergang van water naar stoom. Voor het opwarmen van water van 20 °C naar 100 °C is circa 334 kJ/kg nodig, terwijl voor verdamping circa 2257 kJ/kg benodigd is. Ter vergelijking: het verder opwarmen van stoom van 100 °C naar 500 °C neemt circa 800 kJ/kg op. Hieruit blijkt dat het grootste deel van de warmteonttrekking plaatsvindt tijdens de verdamping van water, wat de sterke initiële afkoeling verklaart.

Het stabiliseren van de temperatuur rond 100 °C wijst erop dat verdere afkoeling na het bereiken van het kookpunt van water (zeer) beperkt is. Op basis van de temperatuurmetingen is het aannemelijk dat vloeibaar water niet langdurig aanwezig blijft bij de heetste delen van de batterijmodule, doordat het water wegstroomt, onvoldoende doordringt of reeds is verdampt. De beperkte verdere temperatuurdaling na circa 20 tot 30 minuten suggereert dat de bijdrage van achtergebleven water in deze fase gering tot verwaarloosbaar is. Daarmee is het aannemelijk dat de verdere afkoeling onder 100 °C in toenemende mate wordt bepaald door natuurlijke afkoeling aan de omgeving (lucht) in plaats van door actieve koeling door het eerder geïnjecteerde water. Dit sluit aan bij de bevinding dat de betreffende modules volledig waren uitgebrand, waarna het resterende materiaal na initiële koeling met het UHD-blussysteem verder geleidelijk afkoelt.

7.2.2 De mate van schade aan het batterijpakket na afloop (E2)
In beide experimenten zijn de modules waarin thermal runaway was geïnitieerd volledig uitgebrand. Dit betekent dat alle batterijcellen in deze modules uiteindelijk in thermal runaway zijn geraakt. In de overige modules bleven de batterijcellen intact, met uitzondering van twee batterijcellen in het eerste experiment die beschadigd raakten doordat de UHD-lans tijdens onbedoeld te hoog werd gepositioneerd en daardoor de middelste module raakte in plaats van de onderste. Deze beschadiging leidde echter niet tot thermische propagatie naar aangrenzende batterijcellen of modules, blijkend uit het brandonderzoek dat laat zien alle andere batterijcellen in deze betreffende module intact zijn gebleven.

7.2.3 Het verloop van thermische propagatie (E3a, E3b en E3c)
Zoals beschreven in paragraaf 2.3.1 kunnen LFP-batterijen vanaf circa 152 °C zelfverhitting vertonen als gevolg van exotherme reacties in de batterijcel. Deze zelfverhitting zal niet direct leiden tot thermal runaway, maar de temperatuurtoename kan wel bijdragen aan het bereiken van de initiatietemperatuur van thermal runaway. De initiatietemperatuur voor thermal runaway ligt bij LFP-batterijen rond de 236 °C.

Cel-cel-propagatie (E3a)
Uit de temperatuurmetingen blijkt dat de temperatuur van de batterijmodules in thermal runaway na inzet van het UHD-blussysteem binnen één tot vijf minuten daalde van maximaal circa 500 °C naar ongeveer 100 °C. Daarnaast bleek uit het brandonderzoek dat de modules waarin thermal runaway was geïnitieerd uiteindelijk volledig waren uitgebrand. Hierdoor kan niet meer worden vastgesteld in hoeverre cel-cel-propagatie binnen deze modules reeds had plaatsgevonden vóór de UHD-inzet. Op basis van de uitgevoerde experimenten kan daarom niet worden vastgesteld of het UHD-blussysteem heeft bijgedragen aan het beperken of stoppen van cel-cel-propagatie binnen de getroffen modules. De resultaten laten wel zien dat het UHD-blussysteem heeft geleid tot een snelle verlaging van de temperatuur tot onder de in de literatuur beschreven temperaturen waarbij zelfverhitting (152 °C) en thermal runaway (236 °C) van LFP-batterijen kan optreden.

Module-module-propagatie (E3b)
Uit de temperatuurmetingen blijkt dat niet-geïnitieerde modules tijdens het experiment tijdelijk in temperatuur stegen tot maximaal 80 °C in het eerste experiment en 105 °C in het tweede, waarbij moet worden opgemerkt dat het batterijpakket was voorverwarmd tot circa 60 °C. De gemeten temperaturen blijven ruim onder de in de literatuur beschreven niveaus waarbij zelfverhitting of thermal runaway van LFP-batterijen kan optreden. Daarnaast bleek uit het brandonderzoek dat de niet-geïnitieerde modules intact zijn gebleven.

De temperatuurmetingen en het brandonderzoek wijzen er daarmee op dat onder de omstandigheden van de experimenten geen module-module-propagatie heeft plaatsgevonden als gevolg van de thermal runaway in de geïnitieerde batterijmodule. Bovendien leidde de inzet van het UHD-blussysteem tot een snelle verlaging van de temperatuur in de getroffen module en beperkte daarmee ook mogelijke propagatie naar andere batterijmodules in hetzelfde batterijpakket.

Pakket-pakket-propagatie (E3c)
De temperatuurmetingen en het brandonderzoek wijzen erop dat onder de omstandigheden van de experimenten geen pakket-pakket-propagatie heeft plaatsgevonden. De snelle temperatuurdaling in de getroffen batterijmodule leidde logischerwijs tot een afname van de hoeveelheid warmte die beschikbaar is voor overdracht naar andere batterijpakketten. Omdat de voorgaande resultaten erop wijzen dat het UHD-blussysteem de thermal runaway binnen de getroffen module kan beheersen, volgt logischerwijs dat hiermee ook de mogelijke propagatie naar andere batterijpakketten wordt beperkt.

7.2.4 Het bepalen en bereiken van een geschikte penetratieplek als randvoorwaarde voor een effectieve inzet (E4)
De resultaten laten zien dat effectieve koeling afhankelijk is van het bereiken van de juiste batterijmodule. Alleen in de module waarin thermal runaway plaatsvond en waarin daadwerkelijk water werd ingebracht, werd een sterke temperatuurdaling van circa 500 °C naar ongeveer 100 °C waargenomen. Hieruit volgt dat het bepalen van een geschikte penetratieplek een belangrijke randvoorwaarde vormt voor een effectieve inzet.

WBC's kunnen hierbij ondersteuning bieden door thermisch afwijkende zones op het batterijpakket zichtbaar te maken. Op basis van de vergelijking tussen de thermokoppelmetingen, de WBC van de Officier van Dienst en de WBC van Team Digitale Verkenning lijkt de

dronecamera, door de hogere resolutie en het overzicht van bovenaf, het meest bruikbaar voor het identificeren van dergelijke hotspots. Tegelijkertijd laten de experimenten zien dat WBC's geen representatief beeld geven van de werkelijke temperaturen binnen het batterij-pakket. Tijdens het tweede experiment werden intern temperaturen tot meer dan 500 °C gemeten, terwijl aan de buitenzijde aanzienlijk lagere temperaturen werden waargenomen. Ook bleek de locatie met de hoogste oppervlaktetemperatuur niet noodzakelijk samen te vallen met de module waarin thermal runaway plaatsvond. Hierdoor kon op basis van warmtebeeldmetingen niet met zekerheid worden vastgesteld welke batterijmodule zich daadwerkelijk in thermal runaway bevond.

Hieruit blijkt dat WBC's bruikbaar zijn voor het identificeren van thermisch afwijkende zones en het monitoren van veranderingen aan het oppervlak van het batterijpakket, maar geen zekerheid bieden over de locatie van de module waarin thermal runaway plaatsvindt. Wanneer onvoldoende effect wordt waargenomen, kan worden overwogen meerdere penetratiepogingen uit te voeren op de meest waarschijnlijke locaties en het resultaat daarvan te beoordelen aan de hand van stoomvorming, weglekkend water en andere waarnemingen.

Verder was tijdens de experimenten bekend hoe de batterijmodules waren gepositioneerd; ze bevonden zich aan een bereikbare zijde van het batterijpakket. In de praktijk zal deze informatie niet altijd beschikbaar zijn en kan de getroffen module bovendien fysiek onbereikbaar zijn vanaf de gekozen inzetzijde. Batterijpakketten kunnen namelijk zodanig gepositioneerd zijn onder de laadruimte of de chauffeurscabine, dat ze fysiek onbereikbaar zijn vanaf de zijkant. Ook kunnen batterijmodules binnen een batterijpakket mogelijk onbereikbaar zijn vanaf de kant waar het UHD-blussysteem wordt ingezet.

7.2.5 Het optreden van stoomvorming bij waterinjectie en bepalen van de inzetduur (E5)

In beide experimenten zijn zowel 'stoomvorming' bij het inbrengen van het UHD-blussysteem als de overgang naar 'weglekkend water' visueel waargenomen. Wanneer stoomvorming en weglekkend water onvoldoende zichtbaar zijn of geen duidelijk beeld geven van het effect van de inzet, kan de inzetduur als aanvullend beoordelingscriterium worden gehanteerd. In het eerste experiment werd het UHD-blussysteem per inzet gedurende circa vijf tot zes minuten toegepast, terwijl in het tweede experiment inzetduren van drie tot vijf minuten werden gehanteerd. Op basis van deze waarnemingen lijkt een inzetduur tot circa vijf minuten praktisch uitvoerbaar. Deze duur kan, bij afwezigheid van duidelijke visuele indicatoren, worden gehanteerd als maximale richttijd voor een afzonderlijke penetratiepoging.

Hiermee zijn stoom en de overgang naar weglekkend water een goede indicator voor het bepalen van de inzetduur van het UHD-blussysteem en kan bij afwezigheid hiervan een inzettijd van maximaal circa 5 minuten gehanteerd worden.

7.2.6 Het realiseren van een stabiele eindsituatie (E6)

De temperatuurmetingen laten zien dat het UHD-blussysteem de temperatuur van een batterijmodule in thermal runaway binnen één tot vijf minuten kan verlagen van circa 500 °C naar ongeveer 100 °C. Deze snelle afkoeling draagt bij aan het versneld terugbrengen van het batterijpakket naar een thermisch stabiele(re) toestand. In de 30 minuten monitoringstijd na de brandweerinzet zijn bovendien geen rook, vlammen of temperatuurtoename meer

waargenomen. Daarmee draagt de UHD-inzet bij aan het bereiken van een stabiele eindsituatie. Dit is gunstig voor de veiligheid van de incidentlocatie en kan ertoe leiden dat eerder kan worden gestart met vervolgactiviteiten zoals berging en herstelwerkzaamheden.

7.2.7 Antwoord op de onderzoeksvragen

Samenvattend laten beide experimenten zien dat het UHD-blussysteem effectief is in het koelen tot ongeveer 100 °C van fysiek gescheiden batterijmodules in batterijpakketten van elektrische vrachtwagens, mits de juiste module kan worden bereikt. Tabel 7.2 geeft een overzicht van de resultaten per effectiviteitsindicator. Op basis van deze resultaten worden de onderzoeksvragen met betrekking tot de effectiviteit van de UHD-inzet beantwoord.

Tabel 7.2 Samenvatting indicatoren effectiviteit

#	Indicator	Onderzoeksresultaat
E1	Het temperatuurverloop binnen de batterij	Inzet van het UHD-blussysteem op de juiste batterijmodule leidt binnen één tot vijf minuten tot een sterke temperatuur-daling van circa 500 °C naar ongeveer 100 °C, waarmee de temperatuur onder de grenswaarden voor zowel thermal runaway als zelfverhitting van LFP-batterijen wordt gebracht.
E2	De mate van schade aan het batterijpakket na afloop van het experiment	Thermal runaway van batterijcellen bleef beperkt tot de batterijmodules waarin thermal runaway was geïnitieerd en cellen die geraakt werden door het UHD-blussysteem
E3a	Thermische propagatie op celniveau (cel-cel)	Het UHD-blussysteem verlaagt de temperatuur van de getroffen module tot onder de grenswaarde voor zelfverhitting en initiatie van thermal runaway van LFP-batterijen. Er kon echter niet experimenteel worden vastgesteld of thermische propagatie op celniveau daadwerkelijk kon worden gestopt.
E3b	Thermische propagatie op moduleniveau (module-module)	Thermal runaway bleef beperkt tot de geïnitieerde batterijmodules. In combinatie met het sterke koelende effect van het UHD-blussysteem is het aannemelijk dat de inzet heeft bijgedragen aan het voorkomen van module-module-propagatie.
E3c	Thermische propagatie op pakketniveau (pakket-pakket)	De snelle temperatuurdaling in de getroffen batterijmodule leidt logischerwijs ook tot een afname van de hoeveelheid warmte die beschikbaar is voor overdracht naar andere batterijpakketten en draagt daarbij ook bij aan het voorkomen van pakket-pakketpropagatie.
E4	Het bepalen en bereiken van een geschikte penetratieplek als randvoorwaarde voor een effectieve inzet	Effectieve koeling vereist het bereiken van de juiste batterij-module; WBC's kunnen daarbij ondersteunen, maar bieden geen zekerheid over de locatie van de module waarin thermal runaway plaatsvindt. Het kan voorkomen dat batterijmodule(s) in thermal runaway fysiek onbereikbaar zijn.

#	Indicator	Onderzoeksresultaat
E5	Het optreden van stoom-vorming bij waterinjectie en bepalen van de inzetduur	Stoomvorming en weglekkend water blijken bruikbare indicatoren voor het aantonen van een koelend effect en kunnen worden gebruikt om de voortgang van de inzet te beoordelen.
E6	Het realiseren van een stabiele eindsituatie	De snelle temperatuurdaling na inzet van het UHD-blussysteem draagt bij aan het versneld bereiken van een thermisch stabiele eindsituatie.

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?

Op basis van de uitgevoerde experimenten blijkt dat effectieve koeling met het UHD-blussysteem alleen wordt bereikt wanneer de batterijmodule waarin thermal runaway plaatsvindt daadwerkelijk wordt geraakt. Het bepalen van een geschikte penetratieplek is daarom essentieel, maar in de praktijk niet altijd eenvoudig, aangezien een WBC de kritische module niet altijd betrouwbaar kan lokaliseren en de module bovendien fysiek onbereikbaar kan zijn door de configuratie van het batterijpakket.

Het vaststellen van de penetratieplek kan met behulp van twee methoden:
> met behulp van een WBC
> op basis van een inschatting van de locatie van de module die zich in thermal runaway bevindt.

In beide gevallen zal moeten blijken of de kritische module daadwerkelijk is geraakt, waarbij indien nodig meerdere penetratiepogingen kunnen worden uitgevoerd. ‘Stoomvorming’ kan daarbij dienen als indicator voor effectieve koeling en de overgang naar ‘weglekkend water’ kan helpen bij het bepalen van de inzetduur. Wanneer deze indicatoren ontbreken, kan een maximale inzetduur van circa vijf minuten per penetratieplek als richtlijn worden gehanteerd. Daarbij blijft het mogelijk dat de kritische module niet bereikbaar is, waardoor effectieve koeling met het UHD-blussysteem niet kan worden gerealiseerd.

6. In hoeverre draagt de inzet van het UHD-blussysteem bij aan het beperken van thermische propagatie en het realiseren van een stabiele en veilige eindsituatie?

Wanneer het UHD-blussysteem erin slaagt de batterijmodule waarin thermal runaway plaatsvindt te bereiken, draagt de inzet aantoonbaar bij aan het verlagen van de temperatuur van deze module. In beide experimenten daalde de temperatuur van circa 500 °C naar circa 100 °C. Voor LFP-batterijen ligt een temperatuur van circa 100 °C ruim onder de temperaturen waarbij zelfverhitting (circa 152 °C) en thermal runaway (circa 236 °C) kunnen optreden. De bereikte temperatuurdaling draagt bij aan het realiseren van een stabiele en veilige eindsituatie. Door de versnelde afkoeling kan een batterijpakket sneller een stabiele en veilige toestand bereiken, waardoor mogelijk eerder met bergingswerkzaamheden kan worden gestart.

7.3 Praktische toepasbaarheid

7.3.1 Ervaren veiligheid (P1)

De incidentbestrijders ervaren de UHD-inzetten als veilig. Op basis van de interviews blijkt dat de meeste vraagstukken tijdens de experimenten op veiligheidsgebied samenhingen met het veilig optreden bij branden in vrachtwagens in de generieke zin: hoe gaan we om met mogelijk exploderende banden van de vrachtwagen en het openen van de laadklep om de lading te blussen? Hoewel men zich niet onveilig heeft gevoeld, vroegen deze onderwerpen wel om bewustzijn tijdens de inzet vanuit de ploegen.

Ook speelde bij beide UHD-ploegen dat het veiligheidsgevoel in positief is versterkt door (1) de goede voorbereiding op de inzet en (2) het succesvol zijn van de inzet. Bij aspect (1) gaven de ploegen aan dat zij door voorbereiding gevaren kenden, wisten hoe ze deze konden herkennen en hoe ze hierop konden acteren.

7.3.2 Functionaliteit UHD-blussysteem (P2)

De incidentbestrijders hebben ervaren dat het UHD-blussysteem functioneerde naar behoren: men kreeg de temperatuur in het batterijpakket omlaag en rookvorming na inzet van het UHD-blussysteem nam af. Wel wordt het goed vaststellen van de temperatuur als lastig ervaren: de daadwerkelijke effectiviteit was hierdoor moeilijk vast te stellen. Daarom was het bijvoorbeeld ook lastig om, na een eerste inzet die resulteerde in een temperatuurverlaging, resterende hotspots vast te stellen.

7.3.3 Samenwerking (P3)

Binnen het aspect samenwerking zien we dat met name de afstemming tussen TS'en en UHD-eenheden een belangrijk aspect is. Waar bevelvoerders en Officier van Dienst tijdens de experimenten regelmatig goede onderlinge afstemming met elkaar hadden over de inzet, zien we dat deze informatie in bepaalde gevallen onvoldoende terecht kwam bij de manschappen van TS'en en UHD-eenheid. Ook wordt door de UHD-ploeg een wisselend kennisniveau ervaren tussen TS'en als het gaat om de bekendheid met de UHD-inzet.

We zien daarmee dat de UHD-inzet niet alleen een technische inhoudelijk component vraagt van de betrokken eenheden, maar ook een afstemmingscomponent. Wanneer het UHD-team wordt ingezet met TS'en die niet bekend zijn met UHD-optreden, is het van groot belang dat er goede afspraken worden gemaakt tussen eenheden en er afstemming plaatsvindt over rollen, inzetdoelen, veiligheidsmaatregelen en tactiek. Van belang is dat dit niet alleen op het niveau van bevelvoerders (en Officier van Dienst) gebeurt, maar ook op het niveau van manschappen. Door te zorgen dat iedereen 'in dezelfde film' zit, kunnen frustraties tijdens een inzet worden voorkomen. Maar bovenal komt dit de veiligheid ten goede. Wanneer het UHD-team ter plaatse komt bij een inzet waarbij de TS'en geen ervaring hebben met een UHD-inzet, mag van het specialistische team verwacht worden dat zij de TS'en meenemen in toepassing van de UHD-inzettactiek binnen de gegeven inzetstrategie. De enkele extra minuten die dit (wellicht) kost, wegen op tegen de tijdswinst die te behalen valt wanneer een inzet veilig en effectief verloopt als gevolg hiervan.

7.3.4 Moeilijkheidsgraad (P4)

Binnen het aspect moeilijkheidsgraad zien we dat zowel de TS'en als de UHD-eenheden de UHD-inzet als gemiddeld tot makkelijk ervaren. De ervaren moeilijkheid werd vooral bepaald door de beperkte bereikbaarheid van de brand in de lading, onder andere door de gesloten

of lastig te openen laadklep en de aanwezigheid van isolatiemateriaal in de wanden van een van de vrachtwagens. De inzetbaarheid van voldoende personeel werd door deelnemers genoemd als randvoorwaarde. Een van de deelnemende UHD-teams achtte een bezetting van zes personen noodzakelijk om naast de bediening van het UHD-blussysteem voldoende capaciteit te behouden voor veiligheidswaarneming en ondersteuning.

Hoewel uit de waarnemingen en het brandonderzoek blijkt dat het UHD-blussysteem tijdens het eerste experiment eenmaal moest worden verplaatst, omdat onbedoeld te hoog werd ingezet en de beoogde batterijmodule niet direct werd bereikt, kwam dit niet naar voren in de interviews als een factor die de inzet volgens de betrokken eenheden complexer maakte.

7.3.5 Fysieke inspanning (P5)

Binnen het aspect fysieke inspanning zien we dat deze inzetten gemiddeld tot licht werd ervaren. Voor de UHD-bediener is daarbij relevant dat uit het experiment is gebleken dat aanvullende hulpmiddelen, zoals rubberen tegels of een zitmogelijkheid, bijdragen aan een stabiele werkhouding tijdens de inzet.

7.3.6 Antwoord op de onderzoeksvragen

In Tabel 7.3 zijn alle resultaten met betrekking tot de indicatoren rondom praktische toepasbaarheid weergegeven. Aan de hand hiervan zullen de betreffende onderzoeksvragen worden beantwoord.

Tabel 7.3 Samenvatting indicatoren praktische toepasbaarheid

#	Indicator	Onderzoeksresultaat
P1	Ervaren veiligheid	De UHD-inzet werd door de deelnemende brandweermensen als veilig ervaren. Een goede voorbereiding, kennis van risico's en het ervaren succes van de inzet droegen bij aan dit veiligheidsgevoel.
P2	Functionaliteit UHD-blussysteem binnen de gekozen inzetstrategie	Het UHD-blussysteem functioneerde volgens de gebruikers naar behoren en leidde zichtbaar tot afkoeling van het batterijpakket en afname van rookvorming. Het vaststellen van het daadwerkelijke effect en het lokaliseren van resterende hotspots werd als lastig ervaren.
P3	Samenwerking	De samenwerking tussen UHD-teams en tankautospuitploegen blijkt afhankelijk van onderlinge afstemming en bekendheid met UHD-optreden. Vooral de informatieoverdracht van leiding-gevenden naar de manschappen verdient aandacht.
P4	Moeilijkheidsgraad	De UHD-inzet werd door zowel UHD-teams als tankautospuit-ploegen overwegend als gemiddeld tot gemakkelijk ervaren. De grootste uitdaging lag in de bereikbaarheid van de ladingbrand.
P5	Fysieke inspanning	De fysieke belasting werd als gemiddeld tot licht ervaren. Aanvullende hulpmiddelen voor de UHD-bediener, zoals een rubberen tegel, kunnen de inzet verder ondersteunen.

7. **Hoe ervaren brandweermensen de UHD-inzet tijdens het experiment, specifiek met betrekking tot ervaren veiligheid, moeilijkheidsgraad en fysieke belasting?**

Uit de vragenlijsten en groepsinterviews zien we dat de UHD-inzet niet heeft geleid tot gevoelens van onveiligheid. Dit resultaat is echter wel verstrekt doordat de bestrijding van de brand in de batterij volgens de ploegen effectief verliep en goed was voorbereid. Ook gaven zij aan dat een goede voorbereiding hielp bij het in beeld brengen van de risico's en daarmee het ervaren veiligheidsgevoel. De UHD-inzet zelf werd door de deelnemende ploegen als gemiddeld tot makkelijk ervaren. De ervaren complexiteit zat name in de lastige bereikbaarheid van de ladingbrand. De deelnemende ploegen gaven aan geen overmatige fysieke belasting te hebben ervaren tijdens de UHD-inzet bij het experiment.

8. **Hoe beoordelen brandweermensen de functionaliteit van het UHD-blussysteem tijdens de inzet?**

De deelnemende brandweermensen beoordelen het systeem als overwegend positief tijdens de inzet. Wel wijzen zij op de moeilijke lokaliseerbaarheid van hotspots.

9. **Hoe ervaren brandweermensen de samenwerking tussen de tankautospuitploeg en het UHD-team tijdens de inzet?**

Brandweermensen ervaren de samenwerking tussen de tankautospuitploeg en het UHD-team als wisselend en sterk afhankelijk van de onderlinge afstemming en de bekendheid met het UHD-optreden. Bevelvoerders en de Officier van Dienst hebben met elkaar op regelmatige momenten afstemming over de inzet. De gemaakte afspraken en gedeelde informatie bereiken de manschappen van beide eenheden echter niet altijd voldoende. Hierdoor was het voor hen soms onduidelijk welke rollen, inzetdoelen, veiligheidsmaat-regelen en tactiek waren afgesproken.

Daarnaast verschilde het kennis- en ervaringsniveau van tankautospuitploegen ten aanzien van UHD-inzetten. Vooral wanneer een TS-ploeg nog niet eerder met een UHD-team heeft samengewerkt, kan dit leiden tot onduidelijkheid bij de ingezette eenheden.

8 Conclusie

In dit onderzoek is met twee full-scale praktijkexperimenten onderzocht of een ultrahogedruk snij- en blussysteem (UHD-blussysteem) veilig, effectief en praktisch toepasbaar is voor de bestrijding van batterijbranden in elektrische vrachtwagens. Beide experimenten zijn uitgevoerd met vrachtwagens voorzien van twee volledig opgeladen LFP-batterijpakketten met prismatische cellen en een energie-inhoud van elk 100 kWh. In beide experimenten werd thermal runaway geïnitieerd door mechanische penetratie en werd handmatig een brandbare lading ontstoken van zestig houten pallets, waarna zich een realistische voertuig- en ladingbrand ontwikkelde. Nadat de voertuig- en ladingbrand door twee tankautospuiten onder leiding van een Officier van Dienst met lagedrukstralen was bestreden, werd het UHD-blussysteem ingezet op de betrokken batterijpakketten.

De resultaten laten zien dat de UHD-inzettactiek, met inachtneming van de hieronder beschreven veiligheidsmaatregelen, een inzetmogelijkheid kan zijn bij batterijbranden van elektrische vrachtwagens. Een succesvolle inzet vereist echter wel specialistische kennis en training en is afhankelijk van het kunnen lokaliseren en bereiken van de batterijmodule in thermal runaway, van een goede samenwerking tussen betrokken eenheden en van de omstandigheden ter plaatse. De veiligheidsmaatregelen die dienen te worden toegepast zijn de volgende:

1. Het gebruik van ten minste twee lagedrukstralen om de UHD-bediener te beschermen tegen fakkels vanuit het batterijpakket, en om andere batterijpakketten en drukhoudende voertuigonderdelen te beschermen tegen hitte-aanstraling.
2. Het ventileren en voorkomen van mogelijke ophopingen van batterijgassen.
3. Het zoveel mogelijk vermijden van blootstelling aan toxische gassen, aanvullend op het dragen van persoonlijke beschermingsmiddelen, inclusief ademlucht, en het toepassen van arbeidshygiënische maatregelen.
4. Het voortdurend monitoren van de gehele brandweerinzet en een veilige werkomgeving, rekening houdend met onder meer het bereik van het UHD-blussysteem, de stabiliteit van het voertuig en mogelijk omvallende lading.
5. Het gebruik van een lange lans of een lans met verlengstuk, zodat een minimale lanslengte van 130 cm wordt bereikt, en waar nodig van ondersteunende hulpmiddelen voor de UHD-bediener, zoals een zitmogelijkheid.

Voor wat betreft de effectiviteit van het UHD-blussysteem laten beide experimenten zien dat de temperatuur in de getroffen batterijmodule na een UHD-inzet daalde van circa 500 °C naar ongeveer 100 °C. Deze snelle afkoeling ging gepaard met duidelijke stoomvorming, wat wijst op effectieve warmteonttrekking aan de batterij. In de overige modules en batterij-pakketten werden geen temperaturen gemeten die wezen op verdere thermische propagatie. Het brandonderzoek na afloop bevestigde dat geen propagatie van thermal runaway had plaatsgevonden. Daarmee draagt het UHD-blussysteem aantoonbaar bij aan het versneld stabiliseren van een batterijpakket en het realiseren van een veilige(r) eindsituatie.

Voor de praktische toepasbaarheid van het UHD-blussysteem laten de experimenten een overwegend positief beeld zien, waarbij de samenwerking tussen de TS-ploegen en de UHD-ploeg een belangrijk aandachtspunt vormt. Voor een succesvolle UHD-inzet zijn een goede samenwerking, een duidelijke taakverdeling, goede onderlinge afstemming en voldoende kennis van UHD-optreden bij alle betrokken eenheden essentieel.

9 Aanbevelingen voor een handelingsperspectief

Uit deze studie is gebleken dat het UHD-blussysteem op een veilige wijze kan worden ingezet bij branden in de batterij van een elektrische vrachtwagen. Het systeem is niet alleen praktisch toepasbaar, maar in zekere mate ook effectief.

Het onderzoek voldoende biedt handvatten om de verkregen kennis door te vertalen naar de praktijk. In dit hoofdstuk worden de verkregen resultaten gecombineerd met onze ervaringen uit 2024 (Hessels & Brans, 2024) om aanbevelingen te kunnen doen voor een operationeel handelingsperspectief voor Nederlandse UHD-eenheden. Er wordt geredeneerd vanuit het uitgangspunt dat de brand in de (lading van) de vrachtwagen reeds geblust is, of dermate beheerst is dat veilig optreden bij de batterij mogelijk is. De stappen hiervoor vormen onderdeel van regulier brandweeroptreden.

Dit hoofdstuk bouwt – in lijn met de gehouden experimenten – voort op het geadviseerde handelingsperspectief voor UHD-blussystemen bij branden met elektrische personen-voertuigen. Deze adviezen worden aangevuld met adviezen specifiek voor e-trucks. Een deel van de adviezen komt daarom overeen met die in het eerder gepubliceerde rapport.

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 UHD-blussysteem in te zetten, en op de manier waarop het systeem ingezet dient te worden. Tot slot wordt aan de hand van een stroomschema besproken wanneer de inzet van het UHD-blussysteem passend is en wanneer een andere aanpak de voorkeur verdient.

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

9.1 Herkennen

Zodra het voertuig is geïdentificeerd als een elektrisch aangedreven vrachtwagen, is het van belang naar indicatoren te kijken die aangeven of de batterij bij de brand betrokken is. De batterij is namelijk niet in alle gevallen bij het incident betrokken; bij personenauto’s is dit in Nederland naar schatting slechts bij circa 20 % van de incidenten het geval (Hessels, 2025). Wanneer de batterij niet is betrokken bij de vrachtwagenbrand, is er in beginsel geen interventie nodig op het batterijpakket.

Herkenningsindicatoren voor betrokkenheid van de batterij bij brand zijn:

> Rook: grijs-witte rook c.q. damp uit het batterijpakket. Veelal met tussenpozen, doordat cellen achtereenvolgens 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 afgeschermd.

9.2 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.[24]
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, ruiten en laadkleppen 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 of laad-en-losdok.
5. Kijk aan welke zijde van het voertuig de (meeste) gassen en/of fakkels uittreden. Benader het voertuig en batterijpakket vanaf de bovenwindse zijde, bij voorkeur onder een hoek van 45 graden ten opzichte van het voertuig.
6. Indien er geen gasophoping kan plaatsvinden, zoek dan visueel naar indicatoren welke batterijpakketten – en indien mogelijk: welke batterijmodule(s) binnen dit pakket of deze pakketten – in thermal runaway zijn. Een WBC kan hierbij ondersteunen om te kijken welk batterijpakket een verhoogde temperatuur heeft, en waar mogelijk de grootste hotspot in het pakket zich bevindt. Verwijder waar nodig beplating van het voertuig om beter zicht te krijgen op de batterijpakketten.

Als is vastgesteld dat het batterijpakket bij de brand is betrokken:

7. Weeg af of de locatie geschikt is om een UHD-blussysteem in te zetten (zie het blauwe kader ‘Afweging: Bodem- en waterverontreiniging’)
8. Bepaal met de WBC de grootste hotspot. Dit wordt de zogeheten *penetratieplek*, waarop de spuitmond van het UHD-blussysteem wordt ingezet.
9. 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. Ook dient bij de inzetpositie rekening te worden gehouden met potentieel instabiele constructiedelen van de vrachtwagen: deze mogen, indien ze vallen, de UHD-bediener niet verwonden.
10. Als de dichtstbijzijnde inzetpositie niet vrij is van vlammen, zoek dan een andere geschikte inzetpositie.

[24] Let erop dat er op afwijkende plaatsen nog batterijen kunnen zitten, bijvoorbeeld door het achteraf inbouwen van een extra batterijpakket. Ook biedt de rescue informatie sheet veelal informatie over de vrachtwagen zonder opbouw, waar in de praktijk veelal wél een opbouw aanwezig is.

11. 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: Bodem- en waterverontreiniging
Verontreiniging van de bodem of het (oppervlakte)water dient te worden meegenomen als criterium bij de afweging om wel of niet een UHD-blussysteem in te zetten. Het RIVM heeft gedurende deze en eerdere experimenten monsters genomen om de mate van verontreiniging van het bluswater in kaart te brengen. Op basis van de meetresultaten van het RIVM kan gesteld worden dat de inzet van het UHD-blussysteem kan leiden tot een aanzienlijke toename van vervuiling van het bluswater. Deze vervuiling komt vooral vrij met UHD-bluswater dat met de aangetaste batterij in contact is geweest.

Daarom heeft het NIPV, in afstemming met het RIVM, enkele handvatten opgesteld die in dit verband gebruikt kunnen worden bij het maken van operationele keuzes en om te gaan met deze verontreiniging. Deze keuzes zijn gebaseerd op 1) de locatie van het incident en 2) de batterijchemie.

Locatie incident
Er zijn kwetsbare locaties waar het UHD-bluswater schade aan milieu en daarmee ook aan de volksgezondheid kan veroorzaken. Voorkomen moet worden dat het UHD-bluswater terechtkomt in dergelijke gebieden.

Daarom adviseert het NIPV om het UHD-blussysteem niet in te zetten wanneer het bluswater vrijkomt in of uit kan stromen naar:
- Drinkwaterwingebieden
- Landbouwgronden
- Zwemwateren
- (Kwetsbare) natuurgebieden
- (Zeer) kleine waterplassen (<1000m³) met weinig uitstroom.

In die gevallen heeft het de voorkeur om, wanneer dat operationeel mogelijk is, een andere inzettechniek te kiezen die een geringere emissie ter plaatse veroorzaakt, zoals een dompelcontainer.

Batterijchemie
Indien de batterij een LFP-chemie heeft, worden buiten de hierboven beschreven kwetsbare gebieden beperkte risico's verwacht voor het milieu. Met de huidige kennis van samenstelling van UHD-bluswater van LFP-batterijen lijkt indamming van het bluswater niet standaard noodzakelijk. Wanneer de bodem geen verhoogde pH toont (pH lager dan 10), is reiniging van het straatoppervlak door een milieubedrijf vaak niet nodig.

Bij UHD-blussing van NMC- en NCA-batterijen, of batterijen met een onbekende chemie, wordt geadviseerd om maatregelen te treffen die de verspreiding van UHD-bluswater en zware metalen beperken. Hieronder wordt een aantal maatregelen beschreven die daaraan moeten bijdragen.

Het doel van deze maatregelen is het verlagen van de stroomsnelheid van het bluswater, zodat schadelijke zware metalen (de verontreiniging, vaak herkenbaar als kleine zwarte deeltjes) kunnen bezinken op het straatoppervlak. Dit bezonken sediment kan vervolgens door een gespecialiseerd milieubedrijf worden verwijderd, zodat het niet in de bodem of het riool terechtkomt.

Maatregelen
- Net voor de inzet van het UHD-systeem straatkolken afdekken; bijvoorbeeld met een absorptieworst, een vuilniszak met zand, of andere praktische middelen.
- Het beperken van aanvullend regulier bluswater tijdens de UHD-inzet, dat voor verspreiding van het sediment van deeltjes uit de batterij kan zorgen.

> Zo snel mogelijk laten reinigingen van het straatoppervlak door een gespecialiseerd milieubedrijf, wanneer gesedimenteerde zware metalen (herkenbaar als kleine zwarte deeltjes) op het straatoppervlak liggen.
> Met een pH-papier kan na afloop van de UHD-blussing worden gecontroleerd of de bodem bijtende stoffen bevat (hydroxiden).

Voorjaar 2027 publiceert het RIVM een kennisnotitie over de verontreiniging van bluswater.

9.3 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 uitgevoerd:

> Leg één lagedrukstraal klaar als dekking voor het UHD-personeel.
> Als er vlammen uit het batterijpakket komen, leg dan een tweede lagedrukstraal klaar om de vlammen te onderdrukken.
> Leg eventueel één lagedrukstraal klaar voor afscherming van het brandende pakket van andere nabijgelegen batterijpakketten.
> Leg eventueel één lagedrukstraal klaar voor afscherming van het brandende pakket van drukhouders, zoals de band van een vrachtwagen

Dit kan erin resulteren dat in totaal maximaal vier stralen lage druk noodzakelijk zijn.

> 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.

9.3.1 Afgesloten voertuigcabine

Als er sprake is van een afgesloten cabine, dus wanneer alle ramen en deuren nog dicht zijn, is er een explosierisico door de ophoping van brandbare gassen in de cabine. 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 de e-truck ophopen, bijvoorbeeld onder een afdak.

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.[25] Daarbij helpt de nevel van het UHD-blussysteem ook om ventilatie te creëren in het voertuig. Gekozen kan worden om tevens een ventilator in te zetten. Plaats deze voordat de ruiten worden verwijderd, zodat hij direct kan worden aangezet nadat de ramen zijn gebroken.

9.3.2 Veilige werkomgeving

Door brand in de cabine of de laadruimte of trailer van de elektrische vrachtwagen kan een instabiele situatie zijn ontstaan. Lading of constructiedelen kunnen door de brand instabiel zijn geraakt, met het risico op vallende delen tot gevolg. Dit heeft invloed op de UHD-inzet: de UHD-bediener staat immers in de (potentiële) valschaduw van deze onderdelen. Er moet, indien het risico op vallende delen bestaat, eerst worden beoordeeld of de situatie 1) veilig genoeg is of 2) eerst gestabiliseerd moet worden voor de UHD-inzet kan plaatsvinden.

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

9.4 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, voortbouwend op het stappenplan elektrische personenauto's beschreven in Hessels & Brans (2024) en aangevuld met de verkregen kennis uit deze praktijkexperimenten, om de volgende stappen uit te voeren:

1. Gebruik de lange lans of het verlengstuk van het UHD-blussysteem, zodat de lans een minimale lengte heeft van 130 cm.
2. Plaats het UHD-blussysteem op de bij 'verkennen' gevonden penetratieplek (zie hierbij ook de overwegingen bij aandachtspunt 11.b in Bijlage 10 over het vaststellen van de penetratieplek op basis van inschatting).
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 één tot circa vijf minuten duren. Zodra er alleen nog maar water uit het batterijpakket komt (en dus geen stoomvorming), is propagatie van de thermal runaway gestopt.
5. Beoordeel of er nog hotspots aanwezig zijn. Doe dit visueel door het waarnemen van vlammen en/of rook c.q. damp. Een WBC kan ondersteunen in het zoeken naar hotspots.
6. Zet het UHD-blussysteem in op eventueel resterende hotspots.
7. Herhaal dit proces tot geen hotspots meer worden waargenomen. Als criterium kan worden gehanteerd dat er geen vlammen of rook c.q. damp (niet zijnde stoom) uit het batterijpakket komen. Gebruik de CO-meter om eventuele damp te kunnen duiden: CO kan duiden op een thermal runaway die nog gaande is.
8. Monitor het voertuig 30 minuten 1) visueel en 2) met een WBC op temperatuurverhoging. Monitor daarbij meermaals per minuut om het temperatuurverloop te bepalen.

Te allen tijde geldt:

> Treden tijdens de inzet onverwachts heftige effecten op, zoals een grote uitstroom van gassen en/of flinke steekvlammen, trek dan terug en overweeg of en hoe er opnieuw ingezet kan worden.

> Indien de ladingbrand oplaait, trek dan terug, stabiliseer de situatie en zet het UHD-blussysteem dan opnieuw in.

30 minuten monitoringstijd
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 BITET-consortium is gekozen voor een tijd van 30 minuten als praktisch hanteerbaar.

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

> Batterijen kunnen gecompartimenteerd of omsloten zijn met schuim. 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.

(Propagatie van) thermal runaway gestopt of niet?
De inzet van het UHD-blussysteem is succesvol als er na (meerdere keren) inzetten geen vlammen en/of rook meer uit het batterijpakket komen en tijdens de inzetten stoom en weglekkend water zijn 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, kan er sprake zijn van bijvoorbeeld brandende isolatie of dampend water. 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 of stijgt de concentratie vrijkomende CO, 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.

9.5 Nazorg

Als een stabiele situatie is bereikt, dat wil zeggen: er is in dertig minuten geen rook en/of vuur gezien en geen temperatuurstijging met de WBC of CO gemeten, dan kan het incident worden overgedragen aan een derde partij, bijvoorbeeld een berger.

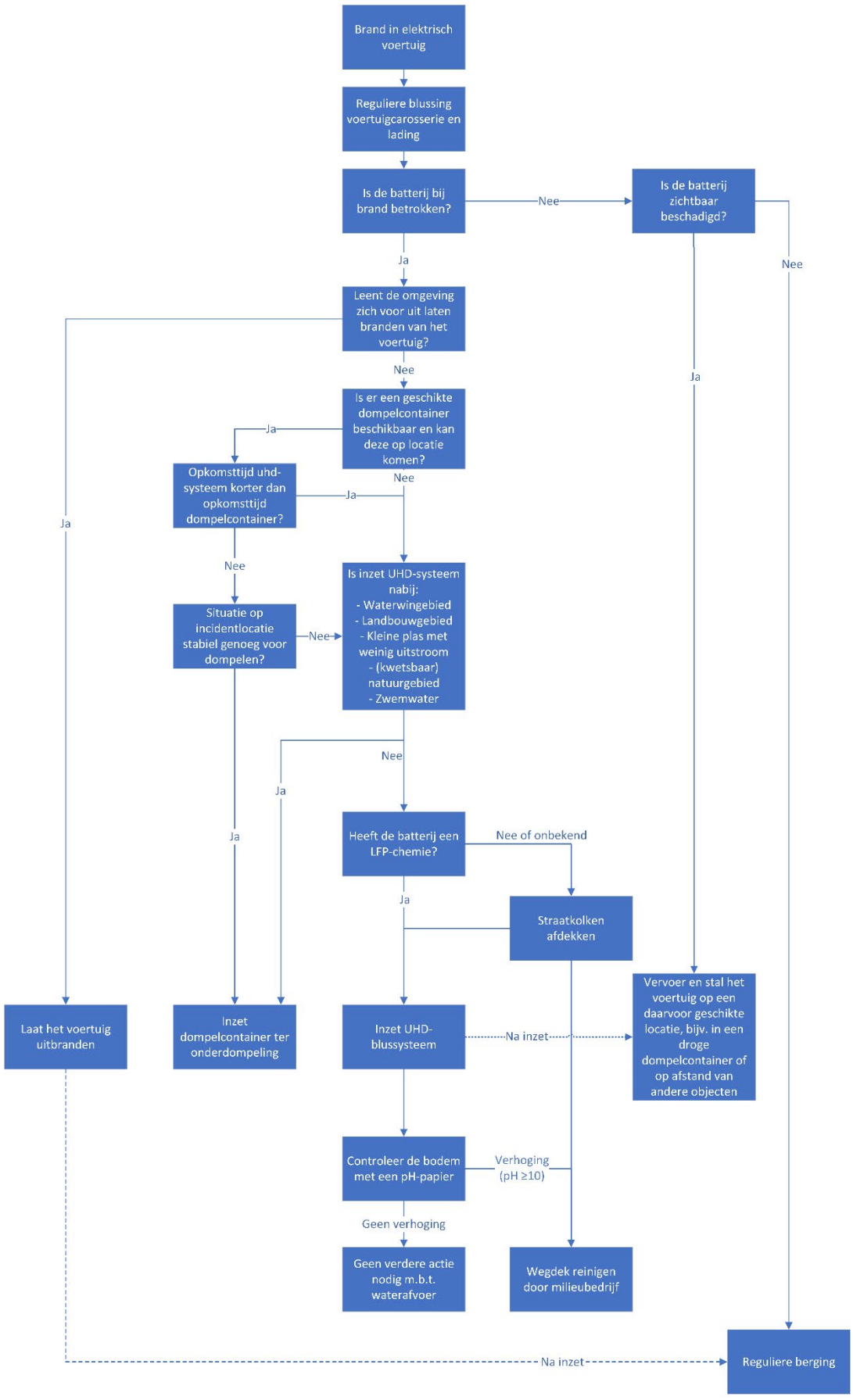
Gezien het risico op herontsteking van het batterijpakket wordt geadviseerd het voertuig op een veilige afstand van andere objecten te plaatsen, zodat geen brandoverslag kan plaatsvinden. Een vuistregel op basis van een modelberekening voor een veilige afstand is: 15 meter voor een truck met (brandbare) lading (Brans & Reinders, 2024). Voor een truck zonder lading is een afstand van 10 meter voldoende. Ook kan gekozen worden om het voertuig, indien deze in de toekomst beschikbaar is, 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.

9.6 Stroomschema

In Figuur 10.1 is een stroomschema opgenomen dat kan helpen bij het bepalen van de brandweerinzet bij een elektrische voertuigbrand.[26] In deze versie zijn ook maatregelen ten aanzien van de afvoer van mogelijk verontreinigd bluswater gegeven. Hierbij kan in afstemming met het RIVM als richtwaarde voor een verhoogde pH-waarde 10 en hoger worden gehanteerd.

[26] 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.



Figuur 10.1 Stroomschema UHD-inzet

9.7 Toepassing bij andere typen zwaar elektrisch materieel

Naast elektrische vrachtwagens bestaat er ook ander zwaar elektrisch materieel dat grotere batterijpakketten bevat die verschillen van die van elektrische personenauto's. Vaak zijn deze voertuigen eveneens uitgerust met een batterijsysteem dat is opgebouwd uit meerdere losse batterijpakketten en/of fysiek afgescheiden batterijmodules, zoals ook zichtbaar is in Figuur 10.2. Daarom zijn de resultaten van dit onderzoek ook relevant voor andere typen zwaar elektrisch materieel; ze impliceren dat met een UHD-inzet ook bij andere materieelsoorten koeling mogelijk is tot 100 °C wanneer water wordt geïnjecteerd in het compartiment waarin thermal runaway plaatsvindt.



Figuur 10.2 Batterijpakketten elektrische graafmachine

9.8 Toepassing bij NMC-batterijen

Gebleken is dat de bereikte koeling van de in het praktijkexperiment gebruikte LFP-batterijen met het UHD-blussysteem tot een temperatuur van 100 °C voldoende is om zowel onder de temperatuur voor exotherme reacties (zelfverhitting) als thermal runaway te komen. Voor NMC-batterijen ligt deze temperatuur van 100 °C weliswaar ruim onder de initiatietemperatuur van thermal runaway (circa 181 °C), maar slechts net boven de temperatuur waarbij zelfverhitting kan optreden (circa 96 °C). Hoewel zelfverhitting niet direct tot thermal runaway leidt, kan voortgaande zelfverhitting eraan bijdragen dat op een later tijdstip alsnog de temperatuur wordt bereikt die een thermal runaway in gang zet. Voor NMC-batterijen blijft het daarom van belang dat zij na de UHD-inzet verder afkoelen aan de omgevingslucht tot ruim onder de temperatuur waarbij zelfverhitting kan optreden, bijvoorbeeld tot onder circa 90 °C.

Referenties

Arcadis. (2023). *Veiligheid rondom emissieloos materieel in de bouw en bouwtransport*. https://open.overheid.nl/documenten/9b224478-3d6d-4dda-9035-ddf1744551b0/file

Brandweeracademie. (2020). *Onderbouwing van risico op elektrocutie/elektrische schok bij incidenten met e-voertuigen*. https://nipv.nl/wp-content/uploads/2024/02/20201207-BA-Onderbouwing-risico-op-elektrische-schok-bij-elektrische-voertuigen.pdf

Brans, H. (2023a). *NIPV-samenvatting van het ELBAS rapport Incidentbestrijding elektrische voertuigen op schepen*. NIPV. https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/06/20230613-NIPV-Incidentbestrijding-elektrische-voertuigen-op-schepen.pdf

Brans, H. (2023b). *Verkenning toekomstige batterijtypen en veiligheid*. NIPV. https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/10/20230712-NIPV-Verkenning-toekomstige-batterijtypen-en-veiligheid.pdf

Brans, H., & Reinders, J. (2024). *Model voor het berekenen van de warmtestraling van elektrische voertuigbranden*. NIPV. https://nipv.nl/wp-content/uploads/2024/06/20240426-NIPV-Model-berekenen-warmtestraling-elektrische-voertuigbranden.pdf

Bugryniec, P. J., Resendiz, E. G., Nwophoke, S. M., Khanna, S., James, C., & Brown, S. F. (2024). Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure — Considering toxic and flammable compounds. *Journal of Energy Storage*, *87*(February), 111288. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111288

Chen, Y., Kang, Y., Zhao, Y., Wang, L., Liu, J., Li, Y., Liang, Z., He, X., Li, X., Tavajohi, N., & Li, B. (2021). A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. *Journal of Energy Chemistry*, *59*, 83–99. https://doi.org/10.1016/J.JECHEM.2020.10.017

DNV. (2022). *Veiligheid elektrisch rijden en laden in logistiek en bouw*. www.dnv.com

Elaad NL. (2026). *Outlook Mobiliteit*. https://elaad.nl/wp-content/uploads/downloads/Outlook-Mobiliteit-2026-NAL-ElaadNL-1.pdf

Emergency Response Guide. (2023a). *Emergency Response Guide XD XF Electric* (Issue 212).

Emergency Response Guide. (2023b). *Emergency Response Guide XD XF XG XGplus* (Issue 212).

Feng, X., Zheng, S., Ren, D., He, X., Wang, L., Liu, X., Li, M., & Ouyang, M. (2019). Key characteristics for thermal runaway of Li-ion batteries. *Energy Procedia*, *158*, 4684–4689. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.736

Heilweil, R., & Rodgers, E. (VOX). (2022). *How to build a better battery*. https://www.vox.com/recode/23027110/solid-state-lithium-battery-tesla-gm-ford

Hessels, T. (2025). *Incidenten met alternatief aangedreven voertuigen*. NIPV.

Hessels, T., & Brans, H. (2024). *Brandexperiment over de inzet van ultrahogedruk snij- en blussystemen bij branden in batterijen van elektrische voertuigen*. NIPV. https://nipv.nl/nieuws/uhd-blussysteem-onder-voorwaarden-geschikt-om-batterijen-van-elektrische-voertuigen-te-blussen/

Huiyao-Laser. (2022). *Types of Lithium Batteries*. https://www.hylasermachine.com/news-battery-welding.html

Lönnermark, A., & Ingason, H. (2004). Recent achievements regarding heat release and temperatures during fires in tunnels. *Safety in Infrastructure-Svédületes!, Budapest 20th-21st October 2004*.

Ohneseit, S., Finster, P., Floras, C., Lubenau, N., Uhlmann, N., Seifert, H. J., & Ziebert, C. (2023). Thermal and Mechanical Safety Assessment of Type 21700 Lithium-Ion Batteries with NMC, NCA and LFP Cathodes–Investigation of Cell Abuse by Means of Accelerating Rate Calorimetry (ARC). *Batteries*, *9*(5), 237. https://doi.org/10.3390/batteries9050237

Ranjith Kumar, R., Bharatiraja, C., Udhayakumar, K., Devakirubakaran, S., Sekar, K. S., &

Mihet-Popa, L. (2023). Advances in Batteries, Battery Modeling, Battery Management System, Battery Thermal Management, SOC, SOH, and Charge/Discharge Characteristics in EV Applications. *IEEE Access*, *11*(January), 105761–105809. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3318121

Reinders, J., Harn, T. van, Brans, H., Stähler, C., & Hessels, T. (2025). *Veiligheid van zero-emissiematerieel in de logistiek en bouw*. NIPV.

RIVM. (2025). *Rekenmethode omgevingsveiligheid lithiumhoudende energiedragers*. https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2024-0194.pdf

Schöberl, J., Ohneseit, S., Schaeffler, S., Förstermann, D., Grahl, L., Jossen, A., Ziebert, C., & Lienkamp, M. (2025). Thermal runaway characterization of cylindrical lithium-ion and sodium-ion batteries with various sizes and energy contents. *Journal of Power Sources*, *648*(March), 237240. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.237240

Schröder, R., Aydemir, M., & Seliger, G. (2017). Comparatively Assessing different Shapes of Lithium-ion Battery Cells. *Procedia Manufacturing*, *8*, 104–111. https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2017.02.013

SWOV. (2020). *Vracht- en bestelauto's*. SWOV. https://swov.nl/nl/factsheet/vracht-en-bestelautos

van der Meer, I. (2025). *Brandende e-truck met lading*. https://bigtruck.nl/nieuws/brandende-elektrische-truck-met-adr-lading#google_vignette

van Harn, T., & Brans, H. (2024). *Explosieveiligheid lithium-ion energieopslagsystemen*. NIPV. https://nipv.nl/wp-content/uploads/2025/01/20241120-NIPV-Explosieveiligheid-lithium-ion-energieopslagsystemen.pdf

Volvo. (2024). *Volvo Trucks – Inside the new revolutionary heavy-duty electric driveline*. https://www.youtube.com/watch?v=JLS9wFr6xaQ

Vos, J., Brans, H., & Reinders, J. (2024). *Literatuuronderzoek naar de brandeffecten van Lithium-ion batterijbranden*. NIPV. https://nipv.nl/wp-content/uploads/2024/04/20240402-NIPV-Literatuuronderzoek-naar-brandeffecten-van-li-ionbatterijbranden.pdf

Wang, Q., Mao, B., Stoliarov, S. I., & Sun, J. (2019). A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*, *73*, 95–131. https://doi.org/10.1016/J.PECS.2019.03.002

Bijlage 1 Deelnemers expertsessie UHD-inzettactiek

Deelnemer	Organisatie
B. Vaes	Gezamenlijke Brandweer
C. Tempelaars	Veiligheidsregio Utrecht
E. Havenga	Gezamenlijke Brandweer
E. Oudwater	Gezamenlijke Brandweer
G. Massa	Veiligheidsregio Haaglanden
J. Keyser	Veiligheidsregio Utrecht
L. Ulwemann	Coldcut Systems
A. Trewe	Coldcut Systems
A. Ferguson	Coldcut Systems
R. Turkenburg	Veiligheidsregio Haaglanden
W. Rochus	Gezamenlijke Brandweer
R. Tettero	Veiligheidsregio Haaglanden
T. Payens	Veiligheidsregio Haaglanden
W. Teeuw	Veiligheidsregio Utrecht
T. Hessels	NIPV
H. Brans	NIPV

Bijlage 2 Observatieprotocol

Observatieprotocol Team Brandonderzoek

Hieronder is een lijst opgenomen met gebeurtenissen die u kunt gebruiken als hulpmiddel tijdens het observeren. Gebruik deze lijst als ondersteuning, maar noteer daarnaast ook alle overige gebeurtenissen, afwijkingen of bijzonderheden die jullie als brandonderzoekers relevant achten. We willen jullie vragen om deze gebeurtenissen alsook andere relevante gebeurtenissen met tijdstip te noteren in het chronologisch overzicht. Aan het einde van dit formulier is nog ruimte voor aanvullende opmerkingen vanuit jullie kant.

Lijst met te observeren gebeurtenissen

Initiatie en Indicatoren Thermal Runaway

> Het initiëren van de thermal runaway door de schroef(s)
> Het geluid van sissende en ploffende batterijcellen
> Het vrijkomen van (witte of grijze) dampen en/of gassen vanuit het batterijpakket.

Effecten Thermal Runaway

> Fakkels vanuit het batterijpakket
> Het vrijkomen van (grote hoeveelheden) batterijgassen
> Het exploderen (dampwolkexplosie) of ontvlammen (wolkbrand) van batterij-gassen/dampen.
> Het wegschieten van batterijcellen of andere projectielen.

Let bij elk effect vanuit de batterij en het voertuig op waar de ploegleden zich bevonden en of zij zichtbaar werden afgeschermd door de ingezette lagedrukstralen. Noteer of zij binnen of buiten het gebied stonden waar vlammen, gassen of projectielen konden reiken, en registreer eventuele (bijna-)blootstelling, zoals near misses of projectielen/gassen/dampen die in hun richting gingen.

Brandeffecten, branduitbreiding en thermische propagatie

> Het overslaan van brand van batterijpakket naar voertuig en/of lading.
> Thermische propagatie (branduitbreiding) van batterijpakket 1 naar batterijpakket 2.
> Het toenemen of afnemen van vlam/rook/dampverschijnselen per batterijpakket.
> Fysische explosie van drukhouders als: Banden, velgen, luchtveren, airbags, remsysteem, etc. welke zijn aangestraald door brand/fakkels

Het inzetten van acties door brandweerploegen (start, handelingen en einde)

> Het arriveren, starten en beëindigen van de brandweerinzet van elke eenheid.
> Aanval met lagedrukstralen.
> UHD-inzet.
> Het vrijkomen van stoom na inbrengen UHD-blussysteem.
> De faseovergang van stoom naar weglekkend water bij UHD-blussysteem.

Overige bijzonderheden

- (Harde) knallen of geluiden
- Losrakende onderdelen of vallende objecten
- Vervorming van voertuigstructuur
- Andere opvallende waarnemingen die mogelijk relevant zijn

Bijlage 3 Individuele vragenlijst

Nederlands Instituut Publieke Veiligheid

Dag: 1

Roepnummer deelnemer: .....

Individuele Vragenlijst Brandexperiment e-trucks

Beantwoord de vragen zoals je tijdens de brandweerinzet hebt ervaren. Alvast bedankt!

Naam: .....

1. Hoe heb je jouw eigen veiligheid tijdens de inzet ervaren?				
Zeer Onveilig	Onveilig	Redelijk	Veilig	Zeer Veilig
O	O	O	O	O
Want:				

2. Hoe ervaar je, vanuit jouw rol, de functionaliteit van het Cobra/Coolfire uhd-blussysteem binnen de gekozen inzetstrategie?				
Zeer Slecht	Slecht	Redelijk	Goed	Zeer Goed
O	O	O	O	O
Want:				

3. Hoe heb je de samenwerking tussen de TS-ploegen en de uhd-ploeg ervaren?				
Zeer Slecht	Slecht	Redelijk	Goed	Zeer Goed
O	O	O	O	O
Want:				

4. Hoe heb je de moeilijkheidsgraad van de inzet ervaren?				
Zeer Moeilijk	Moeilijk	Gemiddeld	Makkelijk	Zeer Makkelijk
O	O	O	O	O
Want:				

5. Hoeveel fysieke inspanning voelde je tijdens de inzet?				
Zeer Zwaar	Zwaar	Gemiddeld	Licht	Zeer Licht
O	O	O	O	O
Want:				

1/1

Bijlage 4 Verklaring deelname praktijkexperiment

Nederlands Instituut Publieke Veiligheid

Roepnummer deelnemer:

.....

Verklaring deelname aan het onderzoek brandexperimenten over de inzet van uhd-blussystemen op elektrische vrachtwagens

Ik, ..., verklaar hierbij het volgende:

- Ik begrijp wat het doel is van het onderzoek waaraan de onderzoekers, Henk Brans, Tom Hessels en Nils Rosmuller, mij hebben gevraagd deel te nemen.
- Ik doe uit vrije wil mee aan dit onderzoek.
- Ik ben op de hoogte van de mogelijkheid om mijn eigen deelname aan het onderzoek op ieder moment stop te zetten.
- Ik geef toestemming aan de onderzoekers om de gesprekken met mij op te nemen. De audio-opnamen van de gesprekken worden gebruikt voor transcriptie-doeleinden en worden niet gepubliceerd.
- Ik geef toestemming aan de onderzoekers om foto- en filmopnamen van mij te maken en deze te gebruiken voor zowel onderzoeksdoeleinden als publicatie.
- Ik begrijp dat de resultaten van dit onderzoek gebruikt kunnen worden voor wetenschappelijke doeleinden en gepubliceerd kunnen worden.
- Mijn naam zal niet worden gepubliceerd en de data zal vertrouwelijk en anoniem worden verwerkt binnen elke fase van het onderzoek.
- Ik weet dat ik voor vragen, klachten of verdere informatie over het onderzoek, de onderzoekers kan contacteren op e-mailadres: <e-mailadres> of telefoonnummer <telefoonnummer>.
- Deze verklaring is mondeling met mij doorgenomen. Ik heb eventuele vragen over de inhoud over deze verklaring en het onderzoek kunnen stellen aan de onderzoekers en deze zijn naar tevredenheid beantwoord.

Datum: ..... Plaats: .....

Handtekening deelnemer:

.....

1/1

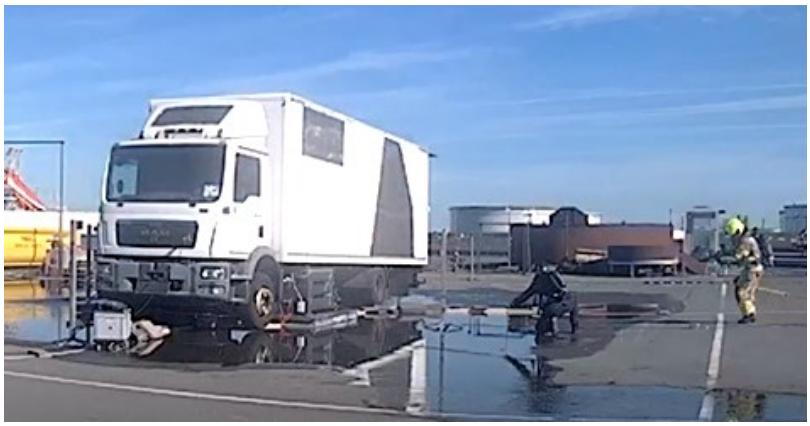
Bijlage 5 Beeldverslag eerste experiment

In deze bijlage worden de audiovisuele observaties tijdens het eerste experiment weergegeven in de vorm van een beeldverslag. De gehanteerde tijd *vanaf start* begint bij 10:34:00 CEST (+0:00:00 EXP), overeenkomend met het inbrengen van de eerste schroef in het batterijpakket ter initiatie van thermal runaway.[27] Hierbij geeft CEST de kloktijd weer en EXP de verstreken tijd sinds de start van het experiment. Alle tijdstippen zijn weergegeven in het formaat *uren : minuten : seconden*. Aanvullend zijn notulen opgenomen van gemeten temperaturen op het batterijpakket met de WBC.

B5.1 Beeldverslag

Tabel B5.1 bevat het beeldverslag van het eerste praktijkexperiment, opgesteld op basis van de audiovisuele observaties door de brandonderzoekers. Het beeldverslag is aangevuld met een toelichting en beeldmateriaal van de waargenomen gebeurtenissen.

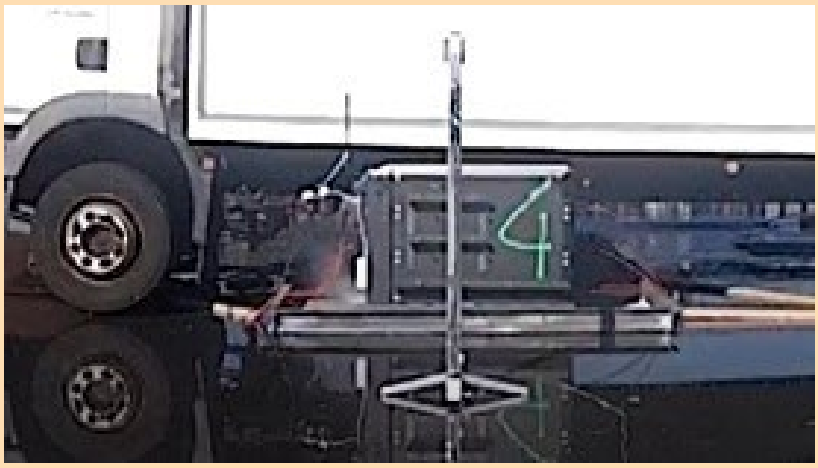
Tabel B5.1 Beeldverslag eerste experiment

CEST *Kloktijd*	**EXP** *Tijd vanaf start*	**Beeldmateriaal met toelichting**
10:34:00	+0:00:00	 Om 10:34:00 uur (+0:00:00) wordt de eerste schroef ingebracht en circa een halve minuut later om 10:43:35 (+0:00:35) de tweede schroef, beide in de onderste module van hetzelfde batterijpakket, waarmee thermal runaway in dit batterijpakket wordt geïnitieerd. Zes seconden voor het inbrengen van deze

[27] De observaties en videobeelden waren oorspronkelijk gesynchroniseerd op een referentietijdstempel van 10:08:00 CEST (–26:00:00 EXP). Op dit moment maakten NIPV-medewerkers een duidelijk zichtbaar armgebaar, dat is gebruikt voor de synchronisatie van de videobeelden en observaties. Voor de analyse zijn alle tijdstippen vervolgens 26 minuten verschoven, zodat het moment van het inbrengen van de eerste schroef samenvalt met +0:00:00 EXP.

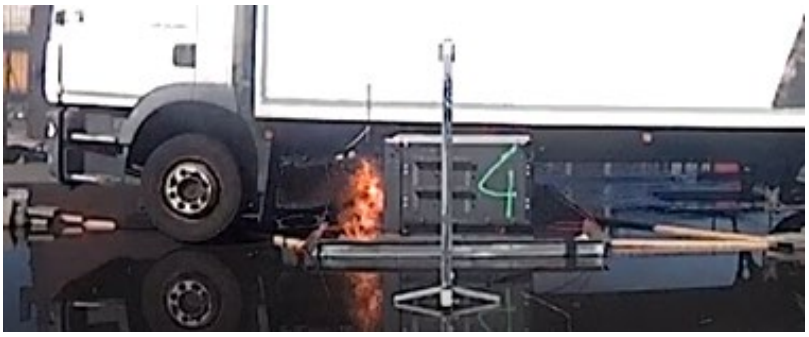
tweede schroef wordt overigens al een plofgeluid waargenomen uit het batterijpakket, wijzend op het openbarsten van de eerste batterijcel.

10:38:20 +0:04:20



In de hierop volgende elf minuten raken verschillende batterijcellen in thermal runaway raken, te horen aan de plofgeluiden (poppen) en te zien aan lichte rookverschijnselen (batterijgassen en -dampen) die vrijkomen. Deze zijn niet altijd even goed zichtbaar op het videobeeld, maar beginnen al wel vijf seconden na het inbrengen van de tweede schroef; op dit beeld om 10:38:20 (+0:04:20) zijn deze gassen en dampen links van het batterijpakket zichtbaar.

10:49:00 +0:15:00



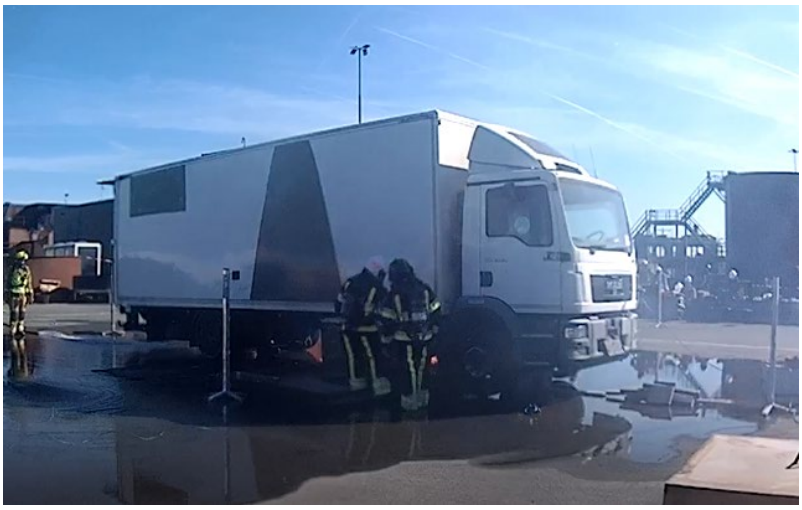
Vanaf 10:45:18 (+0:11:18) zijn de eerste vlammen zichtbaar rondom het batterijpakket. De vlammen werden ontstoken door de vonkengenerator (bougie) die links op het batterijpakket was gemonteerd. Zichtbaar zijn ook de vlamverschijnselen aan de linkerkant, die in eerste instantie nog niet goed zichtbaar zijn op het ingezoomde beeld, maar vanaf 10:49:00 (+0:15:00) wel duidelijk zichtbaard zijn en in volume toenemen.

10:52:10 +0:18:10



Om 10:52:10 (+0:18:10) wordt een fakkel waargenomen vanuit het batterijpakket. Circa een seconde zijn grotere vlammen zichtbaar rondom het batterijpakket, zoals op het beeld weergegeven. Er was niemand in de buurt van het batterijpakket op dit moment.

10:54:40 +0:20:40



Om 10:54:40 (+0:20:40) wordt de lading aangestoken door twee personen in brandweerkleding met behulp van een gasbrander. Hierbij worden door twee vooraf geprepareerde gaten aanmaakblokjes aangestoken die zich in de lading houten pallets bevinden.

11:03:15 +0:29:15



In de minuten na ontsteking van de houten pallets ontwikkelt de ladingbrand zich totdat er van buitenaf zichtbare rook- en vlamverschijnselen zijn. Om 11:03:15 (+0:29:15) worden de eerste tankautospuit (TS 1) en de Officier van Dienst (OvD) geallarmeerd, op het moment dat er zichtbare vlamverschijnselen zijn aan de lading.

11:09:20 +0:35:20



Om 11:09:20 (+0:35:20) staat het dak van de laadruimte in brand en breidt de brand zich uit tot aan de chauffeurscabine. Op dit moment zijn de brandweer-eenheden aanrijdend.

11:15:10 +0:41:10



Om 11:13:04 (+0:39:04) wordt de eerste lagedrukstraal van TS1 ingezet; dit gebeurt eerst vanaf de bijrijderszijde en twee minuten later om 11:15:10 (+0:41:10) vanaf achterzijde van de vrachtwagen (rechts op de foto).

11:17:17 +0:43:17



Ook de tweede lagedrukstraal van TS1 wordt ingezet op de laadruimte van de vrachtwagen; dit gebeurt vanaf 11:17:17 (+0:43:17). Op dit moment worden met twee lagedrukstralen de voertuigcarroserie en -lading geblust. Het UHD-team wordt gealarmeerd om 11:15:05 (+0:44:05).

11:19:38 +0:45:38



Om 11:18:09 (+0:44:09) wordt de eerste lagedrukstaal van TS 2 ingezet tussen de cabine en laadruimte en een minuut later om 11:19:38 (0:45:38) de tweede lagedrukstraal om het batterijpakket te koelen. Op dit moment zijn twee tankautospuiten bezig de voertuigbrand te beheersen onder leiding van een Officicier van Dienst.

11:28:08 +0:54:08



Om de lading te kunnen blussen wordt door de bemanning van TS 1 een spreider ingezet om de laadklep te openen. Dit gebeurt om 11:28:08 (+0:54:08).

11:52:20 +1:18:20



Van 11:52:20 (+1:18:20) tot 11:58:55 (+1:24:55) is de eerste inzet van het UHD-blussysteem te zien, waarbij de UHD-bediener met een verlengstuk recht op het batterijpakket inzet en er witte stoom zichtbaar is als gevolg van de faseovergang van water naar stoom. Verder zijn twee lagedrukstralen paraat om de UHD-bediener te beschermen tegen mogelijke effecten vanuit het batterijpakket en uitbreiding naar drukhoudende voertuigonderdelen en batterijpakketten. Ook is te zien hoe de brandweermens schuin achter de UHD-bediener met een WBC het warmtebeeld monitort, en zijn veiligheidsfunctionarissen zichtbaar die rondom het werkgebied staan en monitoren op mogelijke aanstraling en de ventilatoren goed positioneren.

Naast de gerapporteerde tijdlijn wordt voor wat betreft de veiligheid is nog relevant dat wordt opgemerkt door de brandonderzoekers dat er geen rondomverkenning van de vrachtwagen is uitgevoerd door het UHD-team.



12:00:46 +1:26:46





Van 12:00:46 (+1:26:46) tot 12:05:34 (+1:31:34) vond de tweede inzet van het UHD-blussysteem plaats op het batterijpakket. Hierbij werd aanzienlijk minder stoom waargenomen. Er is gedurende circa vijf minuten ingezet en na het einde van de UHD-inzet werd door de observatoren ook weglekkend water gezien. Tijdens de UHD-inzet werd waargenomen dat de lans bij het penetreren even wegschoot, waardoor twee gaten zijn gemaakt (het gevolg hiervan wordt verder besproken in het brandonderzoek in bijlage 7). Ook op deze beelden is te zien dat er twee lagedrukstralen als veiligheidsmaatregel paraat stonden en er werd gemonitord met WBC's. Er is te zien dat er voldoende ruimte was rondom het voertuig voor alle brandweermensen die een taak hadden bij de UHD-inzet.

Zeven minuten na de tweede UHD-inzet werd door een brandonderzoeker nog een kortstondig rookpluimpje gerapporteerd; dit was echter zo klein, dat het niet waarneembaar was op de videobeelden.

12:40:00 +1:40:00



Op dit beeld is om 12:40:00 (+1:40:00) de vrachtwagen te zien aan het einde van de brandweerinzet en het experiment. In de dertig minuten hierna zijn geen rook- en vlamverschijnselen meer waargenomen.

B5.2 Notulen warmtebeeldcamera van Officier van Dienst

Hieronder zijn de notulen weergegeven van de temperatuurmetingen die zijn uitgevoerd met een WBC en genoteerd zijn door de Officier van Dienst tijdens het eerste experiment. De tijd die hierbij wordt gehanteerd is de kloktijd (CEST). Alle temperaturen zijn in graden Celsius zoals waargenomen op de WBC. Met het bijschrift [*1] of [*2] wordt aangegeven op welke locatie van het batterijpakket de betreffende meting bij benadering is uitgevoerd. Deze locatie is schematisch weergegeven in de tekening.

Eerste Experiment

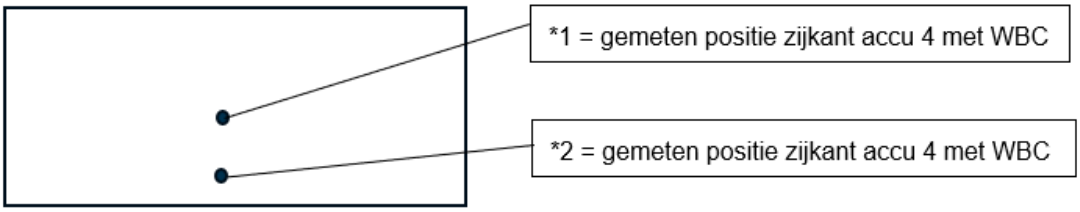
Meetresultaten met WBC van TS-bemanning

Accu 3 (bijrijderszijde vrachtwagen):

> 11:24 uur = 36 °C
> 11:30 uur = 10 °C
> 11:41 uur = 26 °C

Accu 4 die in thermal runaway was gebracht (chauffeurszijde vrachtwagen):

> 11:24 uur = 9 °C
> 11:26 uur = 26 °C
> 11:35 uur = 126 °C
> 11:59 uur = 54 °C
> 12:20 uur = 62 °C [*1]
> 12:32 uur = 65 °C [*1]
> 12:09 uur = 75 °C [*2]
> 12:28 uur = 46 °C [*2]
> 12:32 uur = 46 °C [*2]



Bijlage 6 Beeldverslag tweede experiment

In deze bijlage worden de audiovisuele observaties tijdens het tweede experiment weergegeven in de vorm van een beeldverslag. De gehanteerde tijd *vanaf start* begint bij 10:12:30 CEST (+0:00:00 EXP), overeenkomend met het inbrengen van de eerste schroef in het batterijpakket ter initiatie van thermal runaway.[28] Hierbij geeft CEST de kloktijd weer en EXP de verstreken tijd sinds de start van het experiment. Alle tijdstippen zijn weergegeven in het formaat *uren : minuten : seconden*. Aanvullend zijn notulen opgenomen van gemeten temperaturen op het batterijpakket met de WBC.

B6.1 Beeldverslag

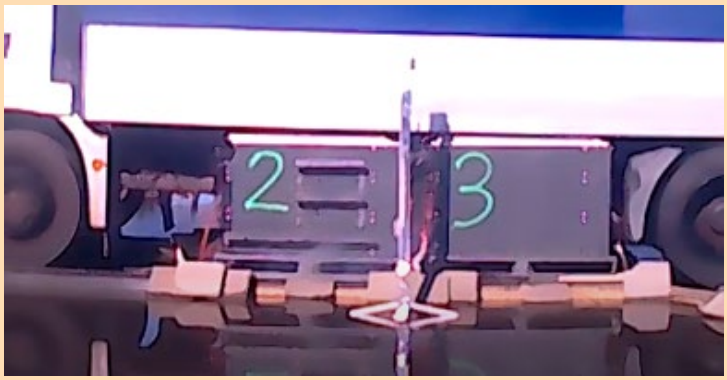
Tabel B6.1 bevat het beeldverslag van het tweede experiment, opgesteld op basis van de audiovisuele observaties van de brandonderzoekers. Het verslag is aangevuld met een toelichting en beeldmateriaal van de waargenomen gebeurtenissen.

Tabel B6.1 Beeldverslag bij het tweede experiment

CEST *Kloktijd*	**EXP** *Tijd sinds start experiment*	**Beeldmateriaal met toelichting**
10:12:30	+0:00:00	 Om 10:12:30 (+0:00:00) wordt de eerste schroef ingeboord en om 10:12:44 (+0:00:14) de tweede schroef, waarmee de thermal runaway in de onderste batterijmodule wordt gestart.

[28] De observaties en videobeelden waren oorspronkelijk gesynchroniseerd op een referentietijdstempel van 09:59:30 CEST (–13:00:00 EXP). Op dit moment maakten NIPV-medewerkers een duidelijk zichtbaar armgebaar, dat is gebruikt voor de synchronisatie van de videobeelden en observaties. Voor de analyse zijn alle tijdstippen vervolgens 13 minuten verschoven, zodat het moment van het inbrengen van de eerste schroef samenvalt met +0:00:00 EXP.

10:13:26 +0:00:56



Om 10:13:26 (+0:00:56) is de eerste plof te horen van een openbarstende batterijcel en is batterijdamp te zien uit het batterijpakket (onderaan de rand van batterijpakket 2; dit is op het videobeeld niet zo duidelijk te zien, maar toch wel zichtbaar). In de volgende veertien minuten zijn er ploffende batterijcellen te horen en vrijkomende batterijdampen te zien van vergelijkbare omvang. De vrijkomende dampen nemen af rond de dertiende en viertiende minuut.

10:17:12 +0:14:42



Om 10:17:12 (+0:14:42) en om 10:37:24 (+0:14:54) worden de derde en vierde schroef in de onderste module ingebracht, nadat de vrijkomende dampen waren afgenomen.

10:28:39 +0:16:09



Na het inbrengen van de extra twee schroeven zijn er wederom ploffende batterijcellen te horen en vrijkomende dampen te zien. Dit houdt aan tot 10:42:40 (+0:28:50), waarna de gassen handmatig worden ontstoken. Op het

		beeld zijn bij de naden en kieren van batterijpakket 2 vrijkomende batterijgassen te zien.
10:41:20	+0:28:50	 Om 10:41:20 (+0:28:50) worden handmatig met een gasbrander de batterijgassen ontstoken, onder dekking van een gereedstaande lagedrukstraal. De vonkengenerator kwam onvoldoende in contact met de gassen, waardoor het niet tot ontsteking kwam. Na ontsteking van de batterijgassen zijn kortstondig vlammen gerapporteerd door de brandonderzoekers; deze zijn echter niet waarneembaar op het videobeeld. Het ploffen van de cellen blijft doorgaan.
10:45:53	+0:33:23	 Om 10:45:53 (+0:33:23) en 10:46:08 (+0:33:38) worden schroef 5 en schroef 6 ingeboord. Dit betreffen de twee schroeven in de middelste module, waarmee ook de middelste module in thermal runaway wordt gebracht.
10:47:18	+0:34:48	

Om 10:47:18 (+0:34:48) wordt wederom een poging tot ontsteking van de batterijgassen gedaan onder dekking van een gereedstaande lagedrukstraal.

10:50:56 +0:38:26



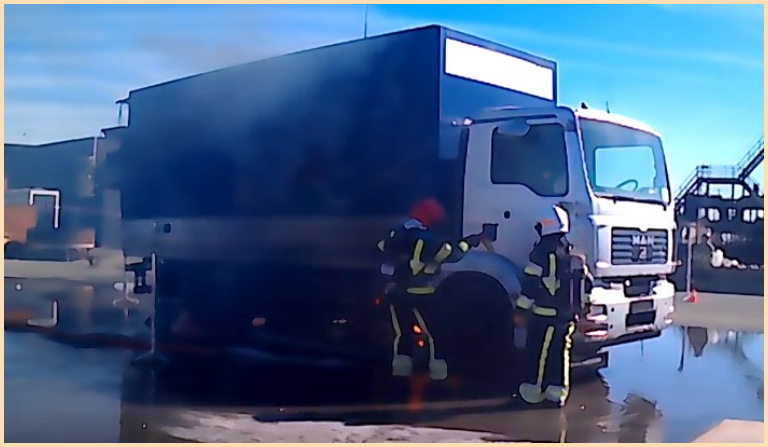
Nadat de batterijgassen ditmaal daadwerkelijk zijn ontstoken, worden er doorlopend vlamverschijnselen waargenomen rondom het batterijpakket als gevolg van de thermal runaway. Deze vlammen nemen vanaf circa 10:50:56 (+0:38:26) in omvang toe en zijn duidelijk zichtbaar.

10:56:42 +0:44:12



Om 10:56:42 (+0:44:12) wordt met een gasbrander de lading handmatig aangestoken door de daarvoor geprepareerde gaten in de buitenwand van de vrachtwagen. Daarna zijn vlammen zichtbaar uit de geprepareerde gaten.

10:57:29 +0:44:59



Om 10:57:29 (+0:44:59) wordt met een gasbrander de bekleding op de bijrijdersstoel in brand gestoken. Na ontsteking van de lading en de cabine ontwikkelt de voertuigbrand zich in de daaropvolgende zeven minuten en is er toenemende rook zichtbaar.

11:04:19 +0:51:49



Vanaf circa 11:04:19 (+00:51:49) zijn er vlamverschijnselen vanuit de laadbak waarneembaar. Op dit tijdstip worden de TS-eenheden en Officier van Dienst gealarmeerd. De tien minuten opkomsttijd van de eerste TS-eenheid start op dit moment.

11:12:05 +00:59:35



Om 11:12:05 (+00:59:35) worden nog duidelijk vlammen rondom het batterijpakket waargenomen. Vanaf dit moment blijft de voertuigbrand zoals op dit beeld, totdat de brandweereenheden arriveren en de inzet starten.

11:15:55 +1:03:25



Om 11:15:55 (+1:03:25) wordt de eerste lagedrukstraal van de eerste tankautospuit (TS 1 ofwel de 110) ingezet. Aanvankelijk richt de blussing zich rondom het voertuig en meerdere keren op het batterijpakket.

11:21:40 +1:09:10



Vanaf 11:21:10 (+1:08:40) wordt ook de tweede lagedrukstraal van de TS 1 ingezet. Het beeld hierboven is van dertig seconden later, namelijk om 11:21:40 (+1:09:10), omdat de zichtbaarheid op de camera's een aantal seconden werd gehinderd.

11:22:55 +1:10:25



Om 11:22:43 (+1:10:13) en 11:22:55 (+1:10:25) worden de eerste en tweede lagedrukstraal van TS 2 ingezet. Nu wordt de voertuigbrand met vier lagedrukstralen van twee tankautospuiten bestreden.

11:23:49 +1:11:19



Op dit beeld is de brandweerinzet circa een minuut na de inzet van de TS 2 vanuit een andere hoek weergegeven. Alle vier de lagedrukstralen zijn te zien.

11:35:10 + 1:22:40



Op dit moment werd de veiligheidsfunctionaris benaderd door een brandonderzoeker en op de hoogte gesteld van een instabiele laadbak, zodat daar voor de veiligheid van de brandweermensen extra rekening mee gehouden kon worden. Vanaf 11:32:50 (+1:41:02) werd door de brandonderzoeker waargenomen dat de zijwand van de laadbak los begon te raken.

11:37:15 + 1:24:45



Vanaf 11:37:15 (+1:24:45) start het UHD-team met een rondomverkenning; het beeld hierboven is van 11:38:20 (+1:25:50) als vier leden van het UHD-team zich aan de andere zijde van de vrachtwagen bevinden ten opzichte van het in thermal runaway zijnde batterijpakket, waarop ze de inzet zullen doen. Vervolgens gaat het UHD-team zich om 11:45:00 (+1:32:30) inzetgereed maken.

11:47:40 + 1:35:10



Om 11:47:40 (+1:35:10) wordt door het UHD-team een steunplank aan het batterijpakket gemonteerd. Omdat het bij dit experiment gebruikte Coolfire UHD-blussysteem een anders uitgevoerde lanskop had dan het bij het eerste experiment gebruikte Cobra-systeem, werd een steunplank aangebracht om de bediening te ondersteunen. De steunplank behoorde tot de uitrusting van het UHD-voertuig.

12:05:09 +1:52:39



Om 12:05:09 (+1:52:39) vindt de eerste UHD-inzet plaats, die met een korte onderbreking om 12:08:10 (+ 1:55:40) van circa dertig seconden, circa vijf minuten duurt tot 12:10:20 (+1:57:50). Deze UHD-inzet richt zich op de onderste module. Bij en direct na de UHD-inzet wordt vrijkomende stoom waargenomen door de observatoren. Op het beeld is te zien dat er een lagedrukstraal als dekking klaarstaat en temperatuur gemonitord wordt met een WBC.

12:15:52 +2:03:22



Om 12:15:52 wordt er een tweede steunplank ter hoogte van de middelste module gemonteerd door het UHD-team onder dekking van een lagedrukstraal.

12:17:23 +2:04:53



		Vanaf 12:17:23 (+2:04:53) start de tweede UHD-inzet op het batterijpakket, waarbij enige stoomvorming wordt waargenomen. Deze UHD-inzet richt zich op de middelste module. Circa anderhalve minuut later wordt weglekkend water waargenomen door de observatoren. De UHD-inzet duurt tot 12:22:11 (+2:09:41) en heeft daarmee circa vijf minuten geduurd.
12:23:10	+2:10:40	Vanaf 12:23:10 (+2:10:40) wordt een derde UHD-inzet op het batterijpakket gedaan. Deze UHD-inzet richt zich op de middelste module. Hierbij wordt veel stoom waargenomen door de observatoren. De derde UHD-inzet op het batterijpakket eindigt om 12:25:10 (+2:12:40) en heeft hiermee circa twee minuten geduurd. Door de observatoren wordt opgemerkt dat op dronebeelden de temperatuur is gedaald van circa 400 graden Celsius bij het begin van de tweede UHD-inzet, naar 100 graden Celsius aan het einde van de derde UHD-inzet. Op dronebeelden wordt om 12:31:10 (+2:18:40) geconstateerd dat de temperatuur in het batterijpakket weer is opgelopen naar 160 graden.
12:31:11	+2:18:40	Rond 12:31:11 (+2:18:40) wordt opgemerkt dat de brand in de laadbak weer oplaait.
12:40:48	+2:28:18	Om 12:40:48 (+2:28:18) wordt een UHD-inzet gedaan op de laadbak, die circa anderhalve minuut duurt en eindigt om 12:42:18 (+2:29:48). Even later wordt een steunplank op de laadbak gemonteerd, en vervolgens wordt om 12:44:22 (+2:31:52) opnieuw een UHD-inzet gedaan op de laadbak die duurt tot 12:48:09 (+2:35:39). Deze inzet heeft circa vier minuten geduurd.
12:49:35	+2:37:05	Om 12:49:35 (+2:37:05) wordt een vierde UHD-inzet op het batterijpakket gedaan (telling brandonderzoeker 1), ofwel een zesde UHD-inzet wanneer de twee UHD-inzetten op de laadbak worden meegeteld (telling observator 2). Deze UHD-inzet richt zich op de middelste module. Deze UHD-inzet duurt tot 12:54:50 (+2:42:20) en neemt hiermee circa vijf minuten in beslag.
12:56:21	+2:43:51	Om 12:56:21 (+2:43:51) wordt een vijfde UHD-inzet op het batterijpakket gedaan (telling observator 1), ofwel een zevende UHD-inzet wanneer de twee UHD-inzetten op de laadbak worden meegeteld (telling observator 2). Deze UHD-inzet richt zich op de onderste module. Deze UHD-inzet duurt tot 12:58:21 (+2:45:51) en hiermee circa twee minuten in totaal.

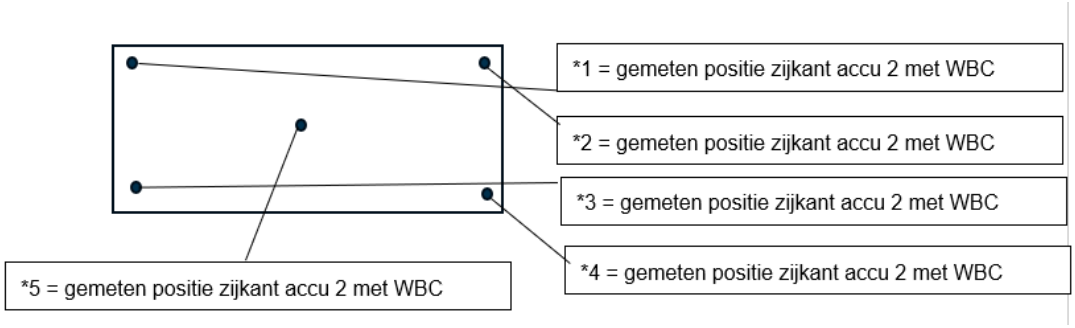
B6.2 Notulen warmtebeeldcamera van Officier van Dienst

Hieronder zijn de notulen weergegeven van de temperatuurmetingen die zijn uitgevoerd met een WBC en genoteerd zijn door de Officier van Dienst tijdens het eerste experiment. De tijd die hierbij wordt gehanteerd is de kloktijd (CEST). Alle temperaturen zijn in graden Celsius zoals waargenomen op de WBC. Met de bijschriften [*1] tot en met [*5] wordt aangegeven op welke locatie van het batterijpakket de betreffende metingen bij benadering zijn uitgevoerd. Deze locaties zijn schematisch weergegeven in de tekening.

Tweede experiment
Meetresultaten met WBC van TS-bemanning

Accu 2 die in thermal runaway was gebracht: (chauffeurszijde voor)

> 11:30 uur = 75 °C [*1] op basis van thermokoppel bleek in de accu 600 °C te zijn
> 11:30 uur = 66 °C [*2] op basis van thermokoppel bleek in de accu 600 °C te zijn
> 11:30 uur = 60 °C [*3] op basis van thermokoppel bleek in de accu 600 °C te zijn
> 11:30 uur = 55 °C [*4] op basis van thermokoppel bleek in de accu 600 °C te zijn
> 11:30 uur = 65 °C [*5] op basis van thermokoppel bleek in de accu 600 °C te zijn
> 11:45 uur = 15 °C [*5] op basis van thermokoppel bleek in de accu 500 °C te zijn



Accu 3: (chauffeurszijde achter)

> 11:32 uur = 60 °C
> 11:45 uur = 60 °C
> Daarna geen metingen meer uitgevoerd, omdat er geen hittestraling meer was op het accupakket en wij zagen dat de temperatuur zakte bij het accupakket.

Bijlage 7 Verslag Brandonderzoek

Auteurs: Robert van den Ende (VRH) en Hans Nederhoff (VRU)

Inleiding

Op 7 en 8 april 2026 heeft het BITET-consortium (Brandweer Inzet Tactieken Energietransitie) real-life brandbestrijdingsexperimenten uitgevoerd met elektrische trucks. Deze proeven beoogden inzicht te geven in de veiligheid, effectiviteit en praktische toepasbaarheid van ultrahogedruk (UHD) snij- en blussystemen bij batterijbranden in elektrische vrachtwagens. De proeven met het UHD-systeem vonden plaats op de Maasvlakte bij oefencentrum RelyOn Nutec.

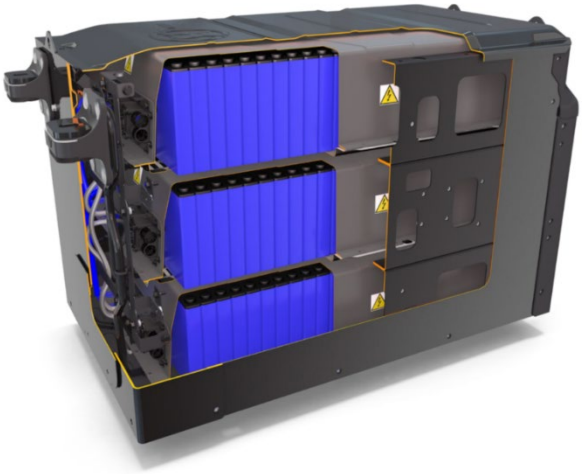
Op verzoek van de projectleider van de experimenten hebben twee brandonderzoekers tijdens de praktijkexperimenten systematische observaties uitgevoerd. Dit waren visuele observaties van het brandverloop en de brandweerinzet. Na afloop van iedere testdag hebben zij de batterijspecialist geassisteerd met het ontmantelen van de accupakketten en het analyseren van sporen in de batterijmodules.

In dit rapport beschrijven wij per test de werkwijze en onze waarnemingen.

Robert van den Ende, Veiligheidsregio Haaglanden
Hans Nederhoff, Veiligheidsregio Utrecht

B7.1 De batterij

Een accu bestaat uit een stalen behuizing met een aluminium deksel, hierin zit 1 string (Figuur B7.1). De string bestaat uit 3 batterijmodules en deze bestaan weer uit 63 cellen in serie. De accu heeft een capaciteit (energie-inhoud) van 100 kWh en is van het subtype LFP (Lithium-IJzer-Fosfaat). De capaciteit is verdeeld over de batterijmodules.



Figuur B7.1

Verder zit er een stalen rek in als aanrijdbeveiliging en twee ophangbeugels voor ophanging aan het vrachtwagenchassis.

De accu's zijn in samenwerking met een batterijspecialist geprepareerd voor een initiatie met lange schroeven, een vonkengenerator (bougie) om directe ontsteking van brandbare gassen te bevorderen en het plaatsen van thermokoppels (Figuur B7.2). De batterijpakketten zullen voor het experiment volledig worden opgeladen tot 100 % State of Charge.



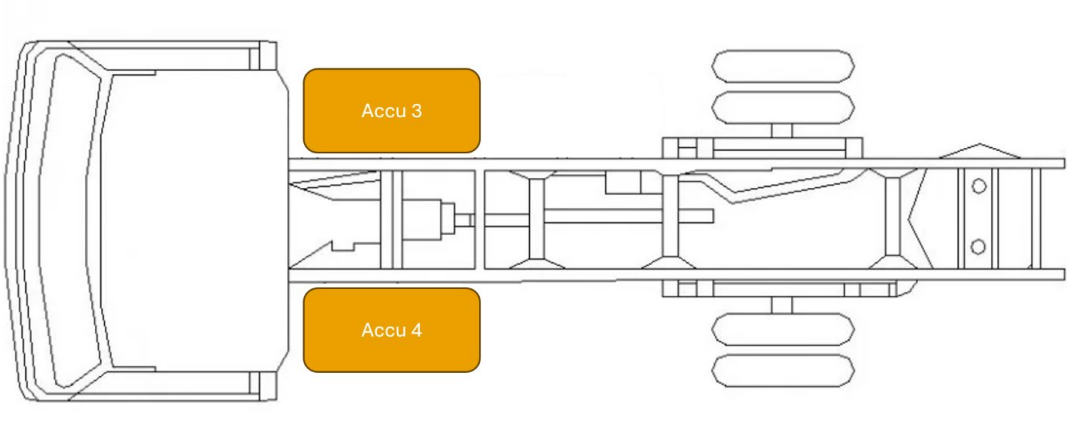
Figuur B7.2

Om de batterijmodules zit een verwarmingselement gemonteerd dat normaliter is bedoeld om bij koude temperaturen het batterijpakket voor te verwarmen. Dit verwarmingselement is

zo geprepareerd dat het op maximaal vermogen kan worden gebruikt om het batterijpakket verder op te warmen om thermische propagatie te bevorderen bij de testen.

B7.2 Test 1 (dinsdag) met inzet Cobra (GB)

Voor de 1e test zijn er twee accu's geplaatst aan weerszijde van de vrachtwagen (Figuur B7.3). Accu 4 zal gebruikt worden om de lange schroeven in te draaien.



Figuur B7.3

Gedurende de start van de test zijn eerst schroeven 1 & 2 ingedraaid, gevolgd na enige tijd door schroef 3 & 4, in de onderste batterijmodule. Na afloop van de testen is het pakket door de batterijspecialist en TBO bekeken en opengemaakt.

Aan de buitenzijde van het pakket was op een aantal plekken smeltschade zichtbaar (kopse kanten en linksvoor). Er waren geen gaten in de behuizing gebrand. Na het verwijderen van de behuizing konden we de drie batterijmodules bekijken.

De bovenste module is op de beschermkap kleine smeltschade te zien. De kap, bestaande uit glasvezeldoek met een kunsthars voor de stevigheid, heeft nog zijn volledige sterkte (Figuur B7.4).



Figuur B7.4



Figuur B7.5

In de module is op de zwarte kunststof wat lichte smeltschade te zien, maar geen beschadiging aan de cellen. Ook is er geen overdrukventiel opengesprongen (Figuur B7.5). Bij het doormeten van de cellen bleek dat alles nog volledig onder spanning stond.

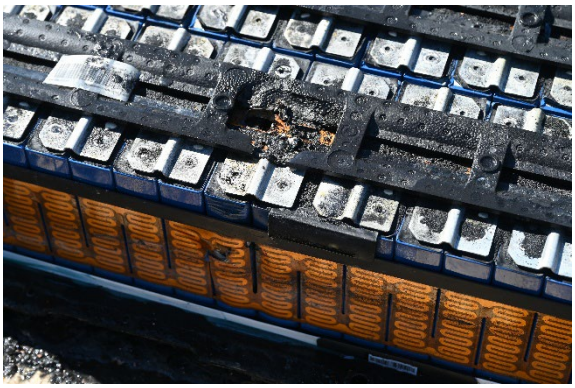
De middelste module heeft op de beschermkap meer brandschade (Figuur B7.6): aan de voorzijde is de kunsthars weggesmolten. De rest van de kap is nog voorzien van de kunsthars laag. Tevens zijn aan de voorzijde twee gaten van inzet van de Cobra te zien. Na het verwijderen van de kap kunnen we zien dat in deze module meer smeltschade is dan in de bovenste module (Figuur B7.7). Op de eerste rij zien we twee cellen waarvan het overdrukventiel is geopend (Figuur B7.8). Dit blijken dan ook de twee cellen te zijn die door de inzet van de Cobra te zijn gepenetreerd. Als we de cellen gaan doormeten, blijken alleen de cellen die door de Cobra geraakt zijn een andere waarde te hebben. De linkercel (Figuur B7.9) heeft geen spanning meer, de rechtercel verminderd spanning en de overige cellen in de module hebben nog volledige spanning. Tijdens de 2e inzet van het UHD-team in de linker cel schoof de lans weg; hierdoor is de rechter cel ook gepenetreerd.



Figuur B7.6



Figuur B7.7



Figuur B7.8



Figuur B7.9

De onderste module heeft de meeste schade opgelopen. Al het kunsthars is weggebrand; hierdoor heeft de kap ook zijn stevigheid verloren en hang het glasvezeldoek los over de module heen (Figuur B7.10). Ook zijn er boven en aan de zijkant gaten gebrand in de kap (zie Figuur B7.11). Na het weghalen van de kap werd zichtbaar dat de gehele module uitgebrand was (Figuur B7.12). Van iedere cel was ook het overdrukventiel opengebarsten. De onderste module is dus volledig uitgebrand.



Figuur B7.10



Figuur B7.11



Figuur B7.12

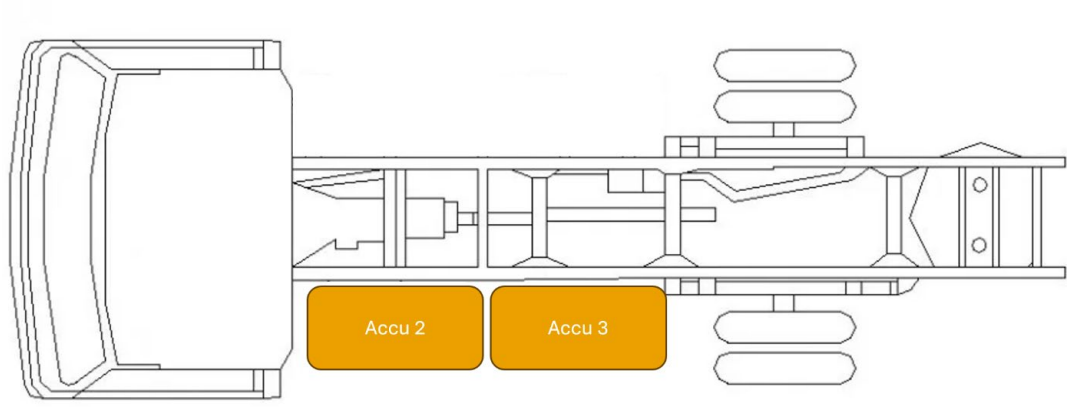


Figuur B7.13

Aan de voorzijde van de module waren de gaten van de 4 ingedraaide schroeven goed zichtbaar, evenals het penetratiegat van de Cobra. Op Figuur B7.13 is bij nr. 1 het gat van de Cobra te zien en bij nr. 2 het gat van de schroef. Bij het nameten van deze module is gebleken dat er in geen van de cellen nog spanning aanwezig was.

B7.3 Test 2 (woensdag) met inzet CoolFire (VRH)

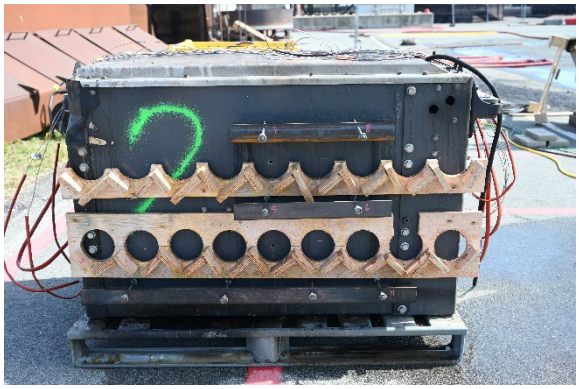
Voor de 2e test zijn er twee accu's geplaatst aan de chauffeurszijde van de vrachtwagen (Figuur B7.14). Accu 2 zal gebruikt worden om de schroeven in te draaien.



Figuur B7.14

Tijdens de start van de test zijn eerst schroeven 1 & 2 ingedraaid, gevolgd na ongeveer 14 minuten door schroef 3 & 4, in de onderste batterijmodule. 19 minuten nadien zijn schroef 5 & 6 in de middelste module gedraaid. Na afloop van de testen is het pakket door de batterijspecialist en TBO bekeken en opengemaakt. Ook is er gekeken naar de houten steunlatten die erop waren gemonteerd door het UHD-team (Figuur B7.15). De schroeven, van ongeveer 45 mm hebben geen schade toegebracht aan de batterijmodule.

Aan de buitenzijde van het pakket was op een aantal plekken smeltschade zichtbaar (kopse kanten en linksvoor). De grootste brandschade zat aan de achterkant van het pakket (Figuur B7.16). Na het verwijderen van de behuizing konden we de drie batterijmodules bekijken.



Figuur B7.15



Figuur B7.16

Op de bovenste module is op de beschermkap smeltschade te zien. De kap, bestaande uit glasvezeldoek met een kunsthars voor de stevigheid, heeft nog zijn volledige sterkte aan de bovenzijde; de zijkanten hebben hun stevigheid verloren door het smelten van de kunsthars. (Figuur B7.17).

In de module is op de zwarte kunststof smeltschade te zien, maar geen beschadiging aan de cellen. Ook is er geen overdrukventiel opengesprongen (Figuur B7.1*). De achterkant van het pakket heeft veel warmteschade opgelopen. Dit correspondeert met de brandschade aan de achterzijde van de behuizing. Bij het doormeten van de cellen bleek dat alles nog volledig onder spanning stond.



Figuur B7.17



Figuur B7.18

Van de middelste module is de stevigheid van de beschermkap volledig weg, omdat alle kunsthars is weggesmolten. Bovenop is de beschermkap kapot gespoten door de CoolFire-inzet, die namelijk te hoog is ingezet en over de module heen heeft gespoten (Figuur B7.19).



Figuur B7.19

Doordat de CoolFire-straal bovenlangs is gegaan, heeft deze naast de kap ook een aantal busbars (aluminium stroomverbinders tussen de afzonderlijke batterijcellen) doorgesneden.

Wat je ook op de module zag liggen, is het rode abrasief dat gebruikt is om door de behuizing te snijden voordat de waternevel de module inging. Nadat de kap was verwijderd, konden we de rest van de module bekijken en konden we constateren dat deze ook compleet was uitgebrand. Nergens stond meer spanning op. Ook was duidelijk te zien dat alle overdrukventielen opengeklapt waren (Figuur B7.20). Ook hier was het abrasief zichtbaar op de cellen. Op Figuur B7.21 is te zien waar schroef 5 is ingedraaid bij nr. 1, en bij nr. 2 is de tweede inzet van de CoolFire te zien.



Figuur B7.20



Figuur B7.21

Ook hier heeft de onderste module de meeste schade opgelopen. Al het kunsthars is weggebrand. Hierdoor heeft deze module ook zijn stevigheid verloren; het glasvezeldoek hangt los over de module heen. Ook zijn er boven en aan de zijkant gaten gebrand in de kap. Na het wegpellen van de kap werd zichtbaar dat deze module, net als de middelste, compleet was uitgebrand (Figuur B7.22). Van iedere cel was ook het overdrukventiel opengebarsten.



Figuur B7.22



Figuur B7.23

Op deze module was wederom het abrasief zichtbaar; ook stonden de cellen niet meer allemaal op rij door beschadiging van meerdere cellen die opgeblazen waren en openstonden.

Wat ook goed zichtbaar was (Figuur B7.23), is de penetratie-ingang van de CoolFire bij nummer 1. Gezien deze ingang en die op de middelste module kunnen we stellen dat de houten steunlatten te hoog opgebracht zijn, waardoor er hoog is ingezet in de cellen. Bij het nameten van deze module is gebleken dat er in geen een van de cellen nog spanning aanwezig was.

Pakket 3 dat gebruikt is bij zowel test 1 als test 2 is de donderdag uit elkaar gehaald (Figuur B7.24).

De bovenste module had de meeste schade op de beschermkap en smeltschade aan de kunststof op de cellen (zie Figuur B7.25).

De middelste module had binnen in ook lichte temperatuurschade aan de kunststof op de cellen en op de beschermkap (Figuur B7.26).

De onderste module had net als de middelste module lichte temperatuurschade Figuur B7.27).

Bij het nameten op de spanning van de drie modules bleek dat alle modules nog voorzien waren van spanning.



Figuur B7.24



Figuur B7.25



Figuur B7.26



Figuur B7.27

Bijlage 8 Ethische verklaring

Inleiding

In dit onderzoek zal aan brandweermensen worden gevraagd om een ultrahogedruk snij- en blussysteem (UHD-blussysteem) in te zetten op een batterijbrand van een elektrische vrachtwagen. Hoewel brandweermensen professioneel zijn opgeleid om met gevaarlijke situaties om te gaan en persoonlijke beschermingsmiddelen dragen, wordt hen in dit experiment gevraagd om handelingen uit te voeren dicht bij de risicobron: het brandende batterijpakket van een elektrische vrachtwagen. Kenmerkend voor een batterijbrand is een zekere mate van onvoorspelbaarheid in het brandverloop.

Het is daarom passend dat wij de keuze voor een praktijkexperiment met onderzoeks-deelnemers (het brandweerpersoneel) kunnen verantwoorden. 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 onderzoeksvoorstel dient te voldoen. Deze principes sluiten naar mening van de onderzoekers voldoende aan bij de principes die door het NIPV in 2025 zijn vastgesteld. De principes van de Radboud Universiteit hebben wij als basis gebruikt voor onze ethische afweging. Deze zeven principes zijn hieronder weergegeven en de bijbehorende onderbouwing ervan is opgenomen in dit document.

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.

B8.1 Wetenschappelijke relevantie

Elektrische voertuigen kennen een brandbestrijdingsprobleem zodra het batterijpakket betrokken raakt bij een voertuigbrand. Dit probleem ontstaat doordat lithium-ion (Li-ion) batterijen in thermal runaway kunnen raken én doordat koelwater de batterijcellen nauwelijks bereikt bij externe koeling (koeling van buitenaf). De behuizing van het batterijpakket is

immers ontworpen om de cellen te beschermen tegen invloeden van buitenaf, zoals water en stof. De thermal runaway is een zichzelf in stand houdend faalmechanisme van Li-ion batterijcellen dat zich door hitte-aanstraling tussen batterijcellen blijft uitbreiden over het batterijpakket totdat het volledig is uitgebrand (thermische propagatie) (NIPV, 2023a). Brandbestrijdingstechnieken waarbij koelwater of andere middelen van buitenaf op het batterijpakket worden aangebracht, blijken daardoor niet effectief in het stoppen van de propagatie van thermal runaway.

In 2024 heeft het NIPV een nieuwe toepassing ontwikkeld voor een reeds bestaand brandbestrijdingssysteem, die aansluit bij de Nederlandse brandweercontext. Dit systeem, oorspronkelijk ontworpen voor scheeps- en gebouwbranden, wordt in dit onderzoek toegepast op batterijpakketten van elektrische voertuigen en richt zich op interne (directe) koeling van de batterijcellen (NIPV, 2024a). Dat wil zeggen: een inzettactiek waarbij water in de behuizing van het batterijpakket wordt gebracht, zodat het koelwater direct in contact komt met de te koelen batterijcellen. Dit onderzoek bestond uit een voorstudie, praktijk-experimenten en het ontwikkelen van aanbevelingen voor een handelingsperspectief voor het bestrijden van branden in elektrische personenauto's. Het bouwde voort op eerder praktijkonderzoek en ervaringen uit Zweden (Coldcut Academy, 2021; Coldcut Systems, 2023 en 2024, MSB, 2023 en 2024), Denemarken (Kleiman et al., 2021), en Tsjechië (J. Hellsten en A. Trewe, persoonlijke communicatie, 17 en 18 juli 2023; EV Firesafe, 2023; O. Suchy, persoonlijke communicatie, 3 en 4 juni 2024). Daarnaast is in België met inbreng van de opgedane kennis uit ons onderzoek een soortgelijke praktijktest uitgevoerd vanuit trainingsdoeleinden door de brandweer Antwerpen (J. Marien en W. Verbakel, persoonlijke communicatie, december 2024).

In de NIPV-studie uit 2024 is door middel van praktijkexperimenten met elektrische personenauto's aangetoond dat het UHD-blussysteem onder voorwaarden veilig, effectief en praktisch toepasbaar kan worden ingezet op elektrische personenauto's.. Inmiddels passen meerdere Nederlandse brandweerkorpsen met een specialistische UHD-eenheid deze methode (succesvol) toe in de praktijk, en ontvangen we feedback op de ingezette methode en het toegepaste handelingsperspectief.

Zodoende is een gedegen basis ontstaan om verdere mogelijkheden te bestuderen voor de toepassing van het UHD-blussysteem in de context van elektrische voertuigbrandbestrijding. Daartoe is dit onderzoeksvoorstel opgesteld over de mogelijke toepassing van het UHD-blussysteem op zwaarder elektrische materieel, in het bijzonder elektrische vrachtwagens. Zoals in het onderzoeksvoorstel is uitgewerkt, zijn batterijpakketten van zwaarder elektrisch materieel, zoals elektrische vrachtwagens of elektrische bouwmachines, substantieel groter en complexer qua systeemopbouw. Het is nog onbekend of het UHD-blussysteem ook effectieve koeling van een zwaar batterijpakket kan bereiken. Bovendien bestaan er voor batterijbranden in elektrische vrachtwagens nog geen bewezen effectieve bestrijdings-methodes, zoals onderschreven in een DNV-studie, alsook in onze eigen studie naar zwaar zero-emissie materieel (DNV, 2022; NIPV, 2025).

Hoewel in 2025 door het NIPV aanbevelingen voor handelingsperspectief zijn opgesteld voor de bestrijding van branden in elektrische vrachtwagens en zware bouwmachines (NIPV, 2025), ontbreekt hierbij nog een bewezen effectieve inzettactiek voor het daadwerkelijk bestrijden van de thermal runaway bij zware batterijpakketten. Dit vormt dan ook een belangrijk kennishiaat. Slechts enkele tactieken, zoals directe koeling, dompeling in een

dompelcontainer of gecontroleerd uitbranden, werken rechtstreeks in op het batterijpakket zelf van een elektrisch voertuig (NIPV, 2023b). Voor elektrische vrachtwagens is een dompelcontainer echter niet beschikbaar, omdat er medio 2026 geen publiek beschikbare dompelcontainer bestaat voor elektrische vrachtwagens (DNV, 2022; NIPV, 2025). Het gecontroleerd laten uitbranden zou vanwege het grotere brandvermogen een aanzienlijk grotere impact hebben op de omgeving vergeleken met elektrische personenauto's (NIPV, 2024b).

Gezien de opkomst van elektrische vrachtwagens en ander zwaar elektrisch materieel op het Nederlandse wegennet, en de beschikbare kennisbasis over de toepassing van UHD-blussystemen bij elektrische voertuigen, achten wij vervolgonderzoek naar nieuwe bestrijdingstechnieken voor grotere en zwaardere elektrische voertuigbranden wetenschappelijk relevant.

B8.2 Proportionaliteit

Het doel van deze praktijkexperimenten is om een eerste stap te zetten in de opbouw van kennis en operationele kunde met betrekking tot de (batterij)brandbestrijding van zware elektrische voertuigen. Daartoe wordt onderzocht in hoeverre een UHD-blussysteem veilig, effectief en praktisch toepasbaar is bij (ten minste) twee elektrische testvrachtwagens waarbij een of meerdere batterijpakketten zijn betrokken.

Er is op dit moment nog geen praktijkexperiment bekend, zowel bij ons als internationale partnerorganisaties zoals RI.SE, UL's FSRI en de NFPA, waarbij een UHD-blussysteem is toegepast op een vrachtwagenbatterijpakket of op een elektrische vrachtwagen. Om uitspraken te kunnen doen over de effectiviteit en praktische toepasbaarheid in een realistische praktijksituatie is het daarom noodzakelijk het UHD-blussysteem te testen op een volledig elektrisch voertuig, met inzet van een volledige brandweerploeg. Een experiment met uitsluitend een los batterijpakket kan wel nieuwe inzichten opleveren, maar is onvoldoende om te beoordelen of de methode ook in een praktijksituatie werkt. Aspecten zoals de bereikbaarheid van batterijpakketten, de werkomstandigheden van een vrachtwagenbrand en de samenwerking tussen de tankautospuit (voor bestrijding van de vrachtwagencarrosserie en eventuele brandbare lading) en het UHD-team kunnen dan immers niet worden meegenomen.

Het feit dat elektrische vrachtwagens anno 2025 al op het Nederlandse wegennet en in binnensteden rijden, benadrukt naar onze mening de urgentie om effectieve bestrijdingstechnieken te onderzoeken. Dit geldt des te meer nu landelijke en regionale overheden de invoering van elektrische vrachtwagens stimuleren via subsidieregelingen (AanZET voor zero-emissie logistiek en SSBB voor ZE-bouwmaterieel) en emissievrije zones (www.milieuzones.nl). Een voortvarende uitvoering van het onderzoek achten wij daarom wenselijk en verdedigbaar, mits dit binnen de grenzen van veiligheid en verantwoorde uitvoering blijft.

De opzet van dit type onderzoek wordt mede bepaald door de beschikbaarheid van geschikt testmateriaal (voertuigen en batterijpakketten), aangezien deze middelen kostbaar zijn. Hierdoor zijn wij in zekere mate afhankelijk van wat externe partijen ter beschikking kunnen stellen. Binnen deze praktische grenzen achten wij het uitvoeren van ten minste twee

experimenten noodzakelijk; pas vanaf dit aantal kunnen eerste valide en onderbouwde bevindingen worden verkregen. Een enkel experiment (n = 1) biedt onvoldoende basis om de resultaten te kunnen duiden of beoordelen op hun betrouwbaarheid. Met twee (zo veel mogelijk) identieke experimenten kan daarentegen wel worden vastgesteld of de waarnemingen consistent zijn en of het UHD-blussysteem onder vergelijkbare omstandigheden vergelijkbaar presteert.

Uit relaties met externe partijen zijn uiteindelijk twee testvrachtwagens beschikbaar gekomen. Dit betreffen twee omgebouwde dieselbakwagens[29], elk voorzien van twee originele vrachtwagenbatterijpakketten. De batterijpakketten worden gemonteerd op dezelfde locatie als in een originele elektrische vrachtwagen, waarmee naar ons oordeel een voldoende representatieve situatie wordt nagebootst. Bij huidige modellen is het bovendien gangbaar dat het voertuigchassis van de dieselvariant en de elektrische variant gelijk zijn (B. de Ridder, persoonlijke communicatie, oktober 2025). Tot slot is gekozen voor de aanwezigheid van (een beperkte hoeveelheid) brandbare lading, omdat deze het brandvermogen in belangrijke mate beïnvloedt en daarmee bepalend is voor de realistische waarde van het experimentele scenario. Uit eerdere studies is gebleken dat de brandbare lading de dominante factor vormt in het totale brandvermogen van voertuigen (NIPV, 2024b).

Met deze aanpak, waarbij ten minste twee full-scale experimenten met elektrische testvrachtwagens worden uitgevoerd, achten wij de inspanningen in een goede verhouding staan tot het verwachte onderzoeksresultaat. Op deze manier kan immers een realistische en beheersbare praktijksituatie worden nagebootst.

B8.3 Methodologische degelijkheid

De onderzoeksmethodologie van dit project bouwt voort op de kennis en ervaring die het NIPV in 2024 heeft opgedaan tijdens praktijkexperimenten met elektrische personenauto's (NIPV, 2024a). Dat eerdere onderzoek bestond uit een vooronderzoek, de uitvoering van praktijkexperimenten en een daaropvolgende analyse. In het vooronderzoek is onder meer kennis opgedaan over veilige initiatie van thermal runaway van batterijpakketten ten behoeve van praktijkexperimenten, is in samenwerking met Coldcut Systems een inzetprocedure ontwikkeld (UHD) en zijn de veiligheidsmaatregelen ontworpen (en waar nodig getest) die in de volgende paragraaf zijn beschreven.

Voor het huidige onderzoek worden vooraf onderzoeksprotocollen opgesteld voor observaties, metingen en interviews. Hierin wordt vastgelegd welke indicatoren relevant zijn en hoe deze via visuele observaties, meetinstrumenten en gestructureerde registraties worden vastgelegd. De analyse van de praktijkexperimenten wordt uitgevoerd op basis van deze vooraf vastgestelde protocollen, zodat kan worden beoordeeld of de UHD-inzet veilig, effectief en praktisch toepasbaar is gebleken.
Daarnaast worden 'doorleefsessies' georganiseerd met de deelnemende UHD-ploegen, Coldcut Systems en DAF. In deze sessies wordt gezamenlijk bepaald hoe de brandweerinzet het beste kan worden uitgevoerd en hoe veiligheidsmaatregelen optimaal kunnen worden geborgd. Hoewel het experiment betrekking heeft op een nieuwe toepassing

[29] De keuze omgebouwde trucks is gemaakt uit financieel oogpunt. De kostprijs van een nieuwe e-truck is (te) hoog, terwijl de kostprijs van een oude dieselvrachtwagen aanzienlijk lager is. Zoals een e-truck nu wordt geproduceerd is een e-truck een dieselvrachtwagen zonder dieseltanks. Op de plek van de dieselmotor en -tanks worden een elektromotor en batterijen geplaatst.

(een elektrische vrachtwagen), sluit de aard van de inzet aan bij de bestaande deskundigheid en werkwijze van de deelnemers. Zij zijn opgeleid en geoefend in het uitvoeren van een UHD-inzet bij elektrische personenauto's volgens de geldende aanbevelingen voor handelingsperspectief en worden vooraf uitgebreid geïnformeerd en bijgeschoold over de specifieke risico's van de elektrische vrachtwagen.

De combinatie van (1) de opgebouwde kennis en ervaring uit het eerdere experimentele onderzoek, (2) de voorbereiding van protocollen voor observaties, metingen en interviews, (3) het in samenspraak met ervaren brandweerpersoneel organiseren van doorleefsessies waarin de brandweerinzet wordt besproken, en (4) het aansluiten bij bestaande werkwijzen achten wij een methodologisch degelijke aanpak voor dit onderzoek.

B8.4 Risico's en Veiligheid

Voor wat betreft de risico's en veiligheid geldt dat de inspanningen van de NIPV-onderzoekers en alle BITET-leden erop gericht zijn om de veiligheidsrisico's voor het deelnemende brandweerpersoneel zoveel mogelijk te minimaliseren. Tegelijkertijd blijft het feit bestaan dat brandweerwerk inherent gepaard gaat met blootstelling aan risico's. Het nabootsen van een realistisch scenario is daarom niet alleen noodzakelijk om een betrouwbare onderzoeksuitkomst te verkrijgen, maar ook om de veiligheid van brandweermensen in echte incidenten te kunnen borgen. Alleen door onder gecontroleerde omstandigheden realistisch te oefenen en te onderzoeken, kan worden geleerd hoe zij in de praktijk op een zo veilig mogelijke manier kunnen handelen. In deze paragraaf worden zodoende de keuzes toegelicht waarbij telkens zorgvuldig de afweging is gemaakt tussen het minimaliseren van de veiligheidsrisico's enerzijds en het behouden van realisme anderzijds, zodat de onderzoeksresultaten daadwerkelijk bijdragen aan een veiliger inzet in de werkelijkheid.

B8.4.1 Initiatie van thermal runaway

In het vooronderzoek van de praktijkexperimenten van het NIPV uit 2024 is onderzocht wat veilige en effectieve methoden zijn voor de initiatie van een thermal runaway. Voor wat betreft de veiligheid van onderzoekers en onderzoeksdeelnemers is hierbij relevant dat bij mechanische initiatie (doorboring) direct een fakkel kan ontstaan uit de aangetaste batterijcel(len) (P. Malmquist, persoonlijke communicatie, 2023). Dit werd bevestigd door het bijwonen van try-outs. Het is daarom voor de veiligheid wenselijk om de thermal runaway op afstand te kunnen initiëren, waartoe wij samen met de batterijspecialist en machinebouwer een geschikte en veilige opstelling zullen bouwen.

B8.4.2 Veiligheidsmaatregelen voor de effecten van een thermal runaway

Voor wat betreft de mogelijke veiligheidsrisico's tijdens de UHD-inzet op het batterijpakket worden de risico's zoveel mogelijk beperkt; de maatregelen daartoe zijn in deze paragraaf uitgewerkt. Tijdens het gehele experiment houdt een aangewezen veiligheidsfunctionaris[30] toezicht op de uitvoering en naleving van deze maatregelen. Het veiligheidsplan wordt voorafgaand aan het experiment opgesteld op basis van meerdere werksessies.
Bij een thermal runaway kunnen drie typen effecten optreden: (1) een batterijbrand met fakkelvorming, (2) een dampwolkexplosie en (3) een toxische gaswolk (NIPV, 2023). Daarnaast moet rekening worden gehouden met het hoogspanningskarakter van het batterijpakket, en daarmee een potentieel elektrocutierisico. Uit de database 'Alternatief

[30] De veiligheidsfunctionaris is opgeleid als Adviseur Gevaarlijke Stoffen.

Aangedreven Voertuigen' blijkt dat wegschietende cellen bij voertuigbranden zelden worden waargenomen, omdat batterijpakketten constructief zo robuust zijn, dat cellen doorgaans niet vrijkomen.[31] Hiervoor zijn in de huidige protocollen dan ook geen specifieke maatregelen opgenomen. Indien de situatie zich toch voortdoet, zal de brandweerploeg zich terugtrekken.

Net zoals in het voorgaande NIPV-onderzoek uit 2024 zijn, in samenwerking met internationale experts en leden van het BITET-consortium, mitigerende veiligheidsmaatregelen opgesteld voor elk van de drie thermal-runaway-effecten, plus elektrische spanning. In Tabel B8.1 is weergegeven hoe de blootstelling aan gevaar voor de brandweerploeg bij elk van deze effecten in het huidige experiment wordt beperkt.

Tabel B8.1 Veiligheidsmaatregelen tegen effecten batterijpakket

Effect	Veiligheidsmaatregelen
(Spontane) fakkels uit aangetaste batterijcellen	> Achter de persoon die het UHD-blussysteem bedient, staat altijd een tweede persoon met een in gebruik zijnde lagedrukstraal die het batterijpakket met bluswater besproeit, zodat mogelijke fakkels direct worden gedoofd. > Er kan door UHD-bediener en/of bevelvoerder worden overwogen om dit aan te vullen met een tweede lagedrukstraal, als er ook daadwerkelijke fakkels worden waargenomen. > Omdat bij de batterijpakket van dit specifieke experiment de druk-ontlastingsventielen recht naar boven uitmonden, hoeft het voertuig niet vanaf een specifieke richting benaderd te worden.
Dampwolkexplosie	> Er zal een vonkengenerator (bougie) nabij het batterijpakket worden geplaatst om directe ontsteking te bevorderen.[32] > Er vindt geen actie nabij het batterijpakket plaats als er geen ontsteking van brandbare gassen is (geen vlamverschijnselen zijn waargenomen).
Toxische wolk	De brandweerploeg draagt altijd persoonlijke beschermingsmiddelen en ademlucht. In het geval de brandweermensen zichtbaar in de toxische wolk hebben gestaan, worden de bluspakken ontsmet volgens geldende procedures.
Blootstelling aan elektrische spanning	Eerdere stroomgeleidingstesten hebben bevestigd dat het elektrocutierisico bij toepassing van een UHD-blussysteem op een batterijpakket niet aanwezig is onder de voorgeschreven operationele omstandigheden. Er bestaat een theoretisch faalscenario, maar dit is zeer onwaarschijnlijk, omdat drie zaken tegelijkertijd fout zouden moeten gaan (NIPV, 2024a).

[31] Database incidenten met alternatief aangedreven voertuigen

[32] De beschikbare batterijpakketten bij dit praktijkexperiment zijn van het subtype lithium-ijzer-fosfaat (LFP). Van dit type is bekend dat er, in vergelijking met nikkel-mangaan-kobaltoxide (NMC)-batterijen, vaker sprake is van een vertraagde ontsteking (Bugryniec et al., 2024; NIPV, 2024c; RIVM, 2025; P. Christensen, persoonlijke communicatie, 24 september 2025). Hoewel bij een State of Charge van 100 % een vertraagde ontsteking onwaarschijnlijk is, wordt uit voorzorg een additionele ontstekingsmethode toegepast om directe ontsteking van brandbare gassen te bevorderen.

Het bluswater wordt volledig gecontroleerd opgevangen en conform de daarvoor geldende procedures afgevoerd, rekening houdend met de mogelijke aanwezigheid van vervuilende stoffen.

B8.4.3 Procedure bij falen van de UHD-inzet

De testvrachtwagens zullen zo zijn opgebouwd dat de batterijpakketten op een veilige manier te verwijderen zijn.[33] De batterijpakketten worden hiertoe op frames onder de vrachtwagen geplaatst. Ze staan daarmee los onder de vrachtwagen. Hierdoor zijn ze veilig met behulp van een heftruck of verreiker te verwijderen. Deze middelen worden geleverd door een van de deelnemende brandweerkorpsen, inclusief opgeleid personeel dat tevens ademlucht draagt. In geval van falen van de UHD-inzet en de batterijbrand niet ter plaatste gestabiliseerd kan worden, kan gekozen worden door de projectleider om de batterij onder te dompelen of gecontroleerd te laten uitbranden op een daartoe geëigende plek. Een dompelcontainer is aanwezig op de locatie van het experiment om het batterijpakket te dompelen.[34] De keuze tussen deze twee opties wordt op het moment zelf gemaakt en is mede afhankelijk van weersomstandigheden (eventuele effecten benedenwinds) en het brandgedrag van de batterij.

Mocht het praktijkexperiment om welke reden dan ook escaleren, dan is tijdens het experiment altijd de capaciteit van twee volledig bemande tankautospuiten aanwezig om escalatie naar de omgeving te voorkomen. Tevens is een industriële autospuit van de Gezamenlijke Brandweer direct inzetbaar om indien nodig aanvullende bluscapaciteit te kunnen leveren. Een industriële autospuit heeft een buitengewone bluscapaciteit van 10.000 liter per minuut.[35] Daarnaast kan ook een beroep kan worden gedaan op de nabijgelegen brandweerkazernes van de Gezamenlijke Brandweer voor aanvullende eenheden.

B8.4.4 Aanwezigheid van brandbare lading

Er is gekozen voor de aanwezigheid van (een beperkte hoeveelheid) brandbare lading, omdat dit een realistisch en inhoudelijk relevant scenario oplevert voor de beoogde onderzoeksdoelen. Uit eerdere studies is gebleken dat de lading een dominante factor vormt in het totale (piek)brandvermogen van een voertuigbrand (NIPV, 2024b). Hoewel het (piek)brandvermogen door de aanwezigheid van lading enigszins toeneemt, blijven de fysieke veiligheidsrisico's in essentie gelijkwaardig aan die van een voertuigbrand zonder lading. Bovendien is de aanwezigheid van enige lading inhoudelijk noodzakelijk om inzicht te verkrijgen in de uitbreiding van de brand van batterijpakket naar batterijpakket. Dit is relevant, omdat de aanwezigheid van meerdere afzonderlijke batterijpakketten een kenmerkend aspect is van zware elektrische voertuigen ten opzichte van elektrische personenauto's.

Er zal gekozen voor een beperkte hoeveelheid brandbare lading in plaats van een volledig beladen voertuig, om zodoende de veiligheidsrisico's van het brandweerpersoneel te reduceren. Op basis van effectberekeningen wordt vooraf een passend ladingsvolume vastgesteld bij het beoogde onderzoeksdoel. Daarnaast wordt geobserveerd of de warmteontwikkeling van de brandende lading kan leiden tot warmtestraling of hitteoverdracht naar het tweede batterijpakket aan de andere zijde van het voertuig.

---

[33] Anders dan bij elektrische personenauto's is dit bij de systeemopbouw van de testvrachtwagens wel mogelijk.

[34] Eerder is beschreven dat er geen publiek beschikbare dompelcontainer bestaat voor elektrische vrachtwagens; geen enkele container is groot genoeg om een elektrische vrachtwagen in te takelen. In deze situatie is het batterijpakket echter demontabel en wordt alleen het batterijpakket gedompeld, zodat het wel in een reguliere dompelcontainer past.

[35] Ter referentie: een straal lage druk, de gemiddelde brandslag, heeft een capaciteit van ca. 450 liter per minuut.

B8.4.5 Toepassing van onderzoeksresultaten in de beroepspraktijk

De resultaten van dit onderzoek kunnen dienen als input voor verdere ontwikkeling van richtlijnen en handelingsperspectieven door brandweerkorpsen in Nederland. Op basis van onafhankelijk onderzoek levert het NIPV hiertoe alle beschikbare kennis en, indien uit het experiment blijkt dat een verantwoorde UHD-inzet mogelijk is, de bijbehorende randvoorwaarden en aanbevelingen voor een handelingsperspectief. De beslissing om een UHD-inzet daadwerkelijk toe te passen in een praktijksituatie wordt uiteindelijk altijd gemaakt door de dienstdoende bevelvoerder of Officier van Dienst op basis van de omstandigheden ter plaatse en een integrale afweging van veiligheid en wenselijkheid.

B8.5 Uitvoering

Het NIPV is bij wet vastgelegd als het publieke kennisinstituut voor crisisbeheersing en brandweerzorg (artikelen 66-75, Wet Veiligheidsregio's). Onderzoekers van het NIPV alsook brandweermensen en medewerkers van brandweerkorpsen uit het BITET-consortium met gedegen kennis van en ervaring met batterijveiligheid, incidentbestrijding en vergelijkbare experimenten hebben dit experiment voorbereid en opgezet.

De in te zetten brandweerploegen bestaan uit volledig gekwalificeerde brandweermensen. De UHD-eenheid die het UHD-blussysteem zal bedienen, bestaat uit brandweermensen die specialistisch zijn opgeleid voor het gebruik van ultrahogedruk-blussystemen. Ter aanvulling ondersteunen ervaren instructeurs van Coldcut Systems het onderzoek bij het ontwikkelen en verfijnen van de inzettactiek die specifiek is gericht op elektrische vrachtwagens.

Het praktijkexperiment wordt zodoende uitgevoerd door vakbekwaam en gekwalificeerd personeel.

B8.6 Gegevensbeheer

De interviewgegevens van de deelnemende brandweerploegen worden verwerkt conform de Privacyverklaring van het NIPV. Alle onderzoeksdeelnemers krijgen voorafgaand aan de interviews de gelegenheid om kennis te nemen van deze verklaring.

B8.7 Autonomie

Met de hierboven 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 ervaren instructeurs van Coldcut Systems tijdens de doorleefsessies.

Tijdens de brandweerinzet heeft de bevelvoerder het uiteindelijke commando over zijn brandweerploeg. Beide bevelvoerders, en de bevelvoerder van de UHD-eenheid, vallen

onder het commando van een Officier van Dienst. 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 projecteider heeft de leiding over het experiment en kan altijd de test afbreken. Een manschap mag zich op elk moment terugtrekken en meldt dit dan aan zijn of haar bevelvoerder. De bevelvoerder kan altijd besluiten om zichzelf of zijn eenheden 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 Officier van Dienst en projectleider. Na dit overleg kan worden besloten om de test te hervatten of definitief af te breken. De bevelvoerder geeft zelf zijn instemming en bereidheid aan om het experiment in deze situatie te hervatten. De projectleider geeft vervolgens toestemming om de test te hervatten. Als wordt besloten om de test af te breken, dan wordt de in paragraaf 4.6 beschreven procedure ingesteld.

B8.8 Referenties bij Bijlage 8

Bugryniec, P. J., Resendiz, E. G., Nwophoke, S. M., Khanna, S., James, C., & Brown, S. F. (2024). Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure: Considering toxic and flammable compounds. *Journal of Energy Storage, 87*, 111288. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111288

Coldcut Academy. (2021). *Li-ion battery pack extinguishing tests*. https://www.dropbox.com/scl/fi/idk0r1wy8vw52k7plhd8z/Li-Ion-Battery-Pack-ExtinguishingTests.pdf?rlkey=ueabe9dwiwm5o29tr1cfxmo7p&e=2&dl=0

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*

DNV. (2022). *Veiligheid elektrisch rijden en laden in logistiek en bouw*. https://www.dnv.nl/publicaties/veiligheid-elektrisch-rijden-en-laden-in-logistiek-en-bouw-219308/

EV Firesafe. (2023, May 7). *EV fire incident management – Case study from Prague*. https://www.evfiresafe.com/post/ev-fire-incident-management-case-study-fromprague

Kleiman, A. B., Koch, N. S., Flecknoe-Brown, K., Wijesekere, T., Husted, B., Valiente, B., Meehan, S., & Moller, C. (2021). DBI. *The ELBAS project – Electric vehicle fires at sea: New technologies and methods for suppression, containment, and extinguishing of battery car fires onboard ships*. https://brandogsikring.dk/files/Pdf/FogU/ELBAS/DBI%20ELBAS%20Report%20-%20Full%20Final%20(rev.%201).pdf

MSB. (2023). *Demonstration av släckmetod för litiumjonbatterier: Metodtillämpning på olika aggregationsnivåer – modul, sub-batteri, elbilspack och fordonsnivå.*

MSB. (2024). *Räddningsinsats där litiumjonbatterier förekommer.*

NIPV. (2023a). *Thermal runaway in een lithium-ion batterijpakket* [Video]. YouTube. https://youtu.be/n_3x5GPFNcc?si=ej1A-SvU8dQO7fFT

NIPV. (2023b). *Onderzoek dompelcontainers*. https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/03/20230206-NIPV-Onderzoek-dompelcontainers.pdf

NIPV. (2024a). *Praktijkexperiment ultrahogedruk snij- en blussystemen bij batterijbranden in elektrische voertuigen*. https://nipv.nl/wp-content/uploads/2024/11/20241126-NIPV-Praktijkexperiment-ultrahogedruk-snij-en-blussystemen-batterijbranden-elektrische-voertuigen.pdf

NIPV. (2024b). *Model voor het berekenen van de warmtestraling van elektrische voertuigbranden*. https://nipv.nl/wp-content/uploads/2024/06/20240426-NIPV-Model-berekenen-warmtestralingelektrische-voertuigbranden.pdf

NIPV. (2024c). *Explosieveiligheid van lithium-ion energieopslagsystemen*. https://nipv.nl/wp-content/uploads/2025/01/20241120-NIPV-Explosieveiligheid-lithium-ion-energieopslagsystemen.pdf

NIPV. (2025). *Veiligheid van zero-emissiematerieel in de logistiek en bouw*. https://nipv.nl/wp-content/uploads/2025/09/20250917-NIPV-Veiligheid-zero-emissiematerieel-in-logistiek-en-bouw.pdf

Radboud Universiteit. (2023). *Protocol Research Ethics Committee Faculty of Science Radboud University*.

RIVM. (2025). *Rekenmethode omgevingsveiligheid lithiumhoudende energiedragers*. https://www.rivm.nl/publicaties/rekenmethode-omgevingsveiligheid-lithiumhoudende-energiedragers

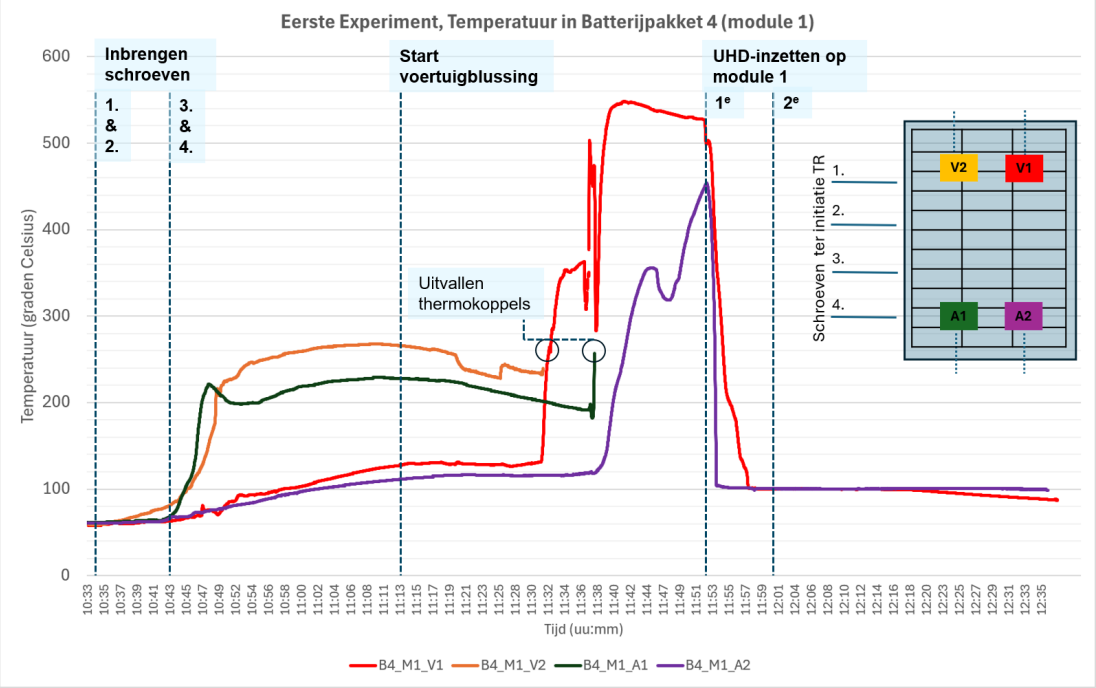
Bijlage 9 Temperatuurmetingen in het batterijpakket

In deze bijlage worden alle temperatuurmetingen weergegeven die bij het eerste experiment (paragraaf B9.1) en het tweede experiment (paragraaf B9.2) zijn genomen. Alle genoemde tijden zijn hierbij de kloktijd (CEST) in *uren : minuten*. Een toelichting van de plaatsing van de thermokoppels is gegeven in paragraaf 3.3.

B9.1 Eerste experiment

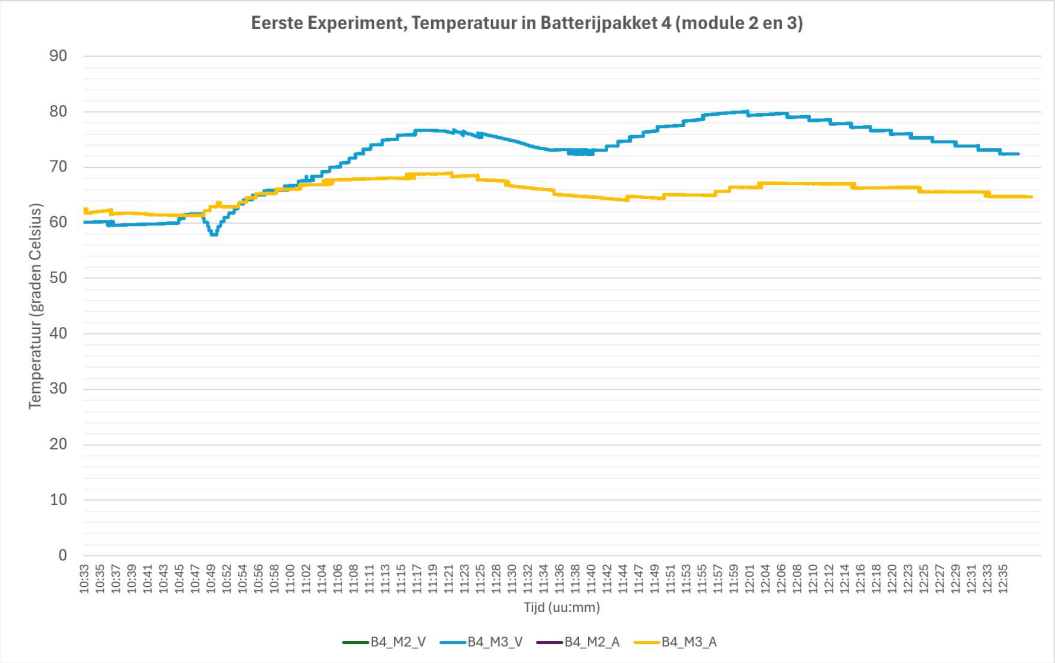
B9.1.1 Batterijpakket 4 (chauffeurszijde voor), module 1 (onder)

In Figuur B9.1 zijn de temperatuurmetingen weergegeven in batterijpakket 4, module 1 tijdens het eerste experiment. Dit was de onderste module, waarin de thermal runaway was genitreerd en de UHD-inzetten hebben plaatsgevonden. Een toelichting bij deze grafiek is gegeven in hoofdstuk 5 en de analyse van de weergegeven metingen in hoofdstuk 7.



Figuur B9.1 Temperatuurmetingen in batterijpakket 4, module 1

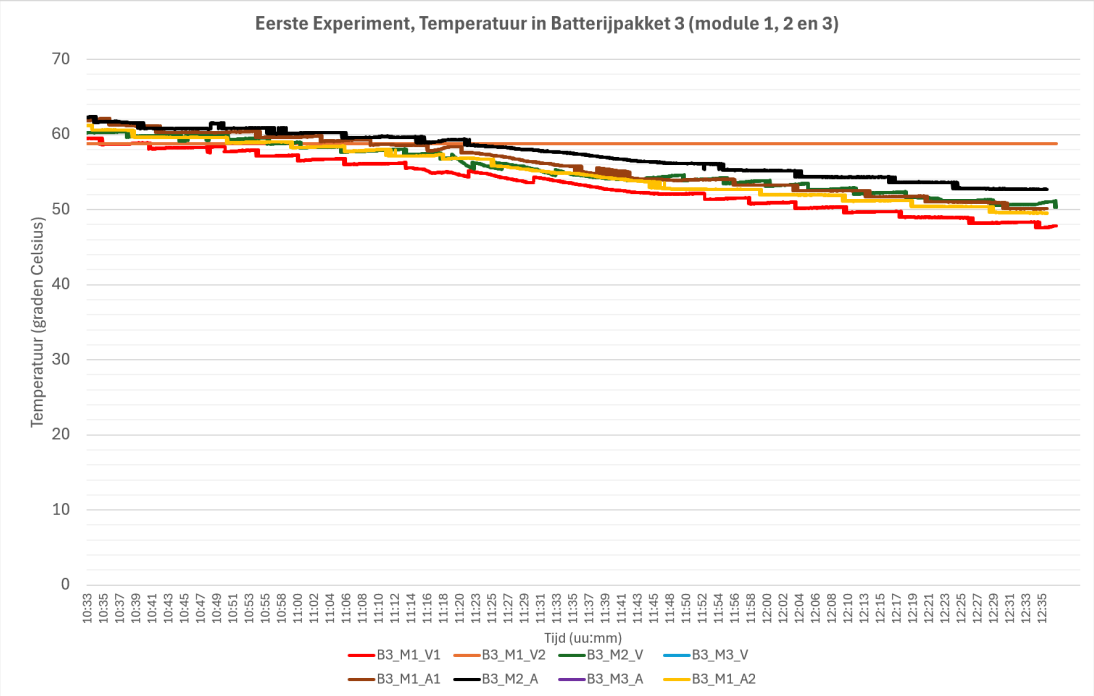
In Figuur B9.2 zijn de temperatuurmetingen weergegeven van het eerste experiment in module 2 en 3 van batterijpakket 4 dat zich in de chauffeurszijde voor bevond, en waar in de onderste module (module 1) thermal runaway is geïnitieerd. De thermokoppels (B4_M2_V en B4_M2_A) in module 2 zijn tijdens het praktijkexperiment uitgevallen. Zodoende zijn enkel gegevens zichtbaar in de grafiek van thermokoppels B4_M3_V en B4_M3_A die zich in de bovenste module (module 3) bevonden.



Figuur B9.2 Temperatuurmetingen batterijpakket 4, module 2 en 3

B9.1.2 Batterijpakket 3 (bijrijderszijde voor)

In Figuur B9.3 zijn de temperatuurmetingen weergegeven van alle modules in batterijpakket 3 tijdens het eerste experiment.



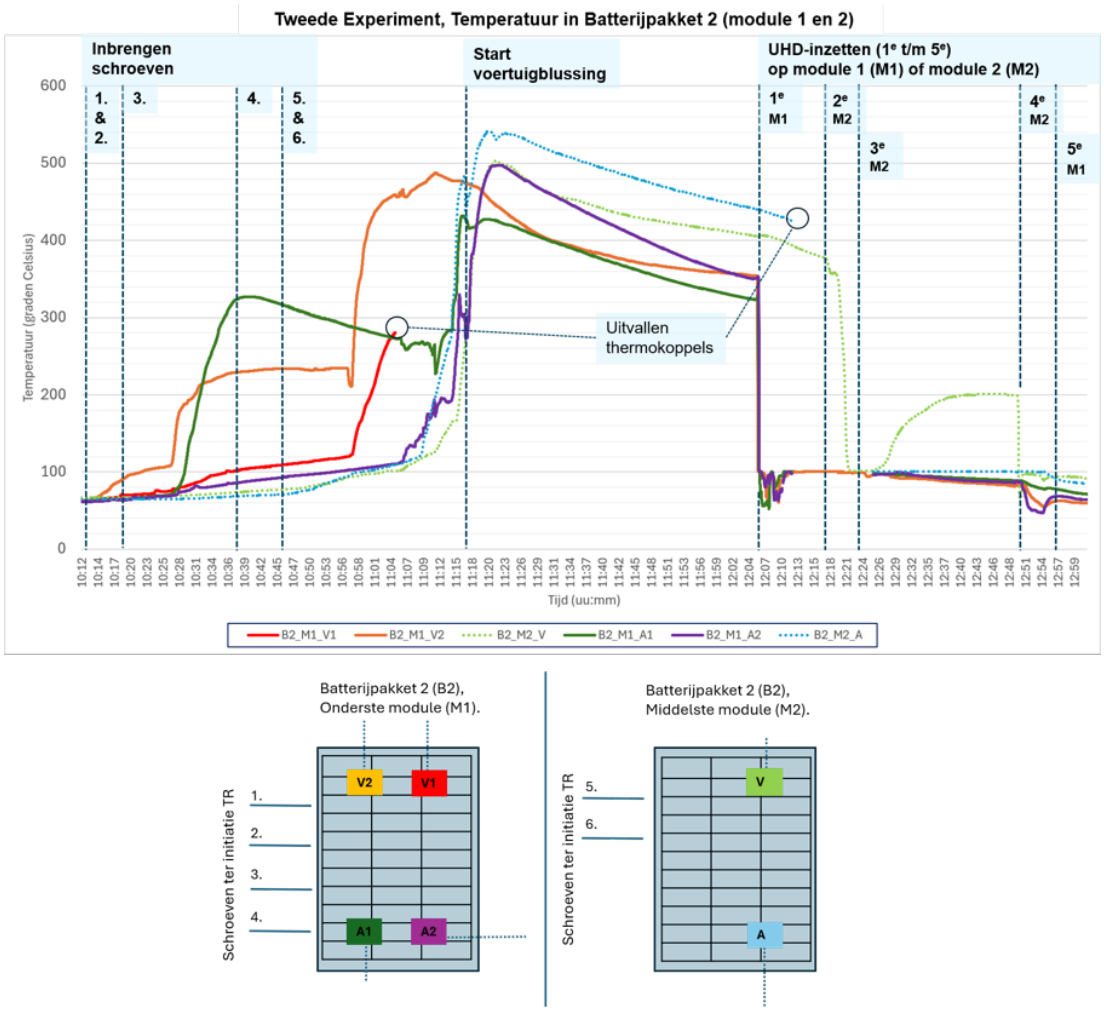
Figuur B9.3 Temperatuurmetingen batterijpakket 3, module 1, 2 en 3

B9.2 Tweede experiment

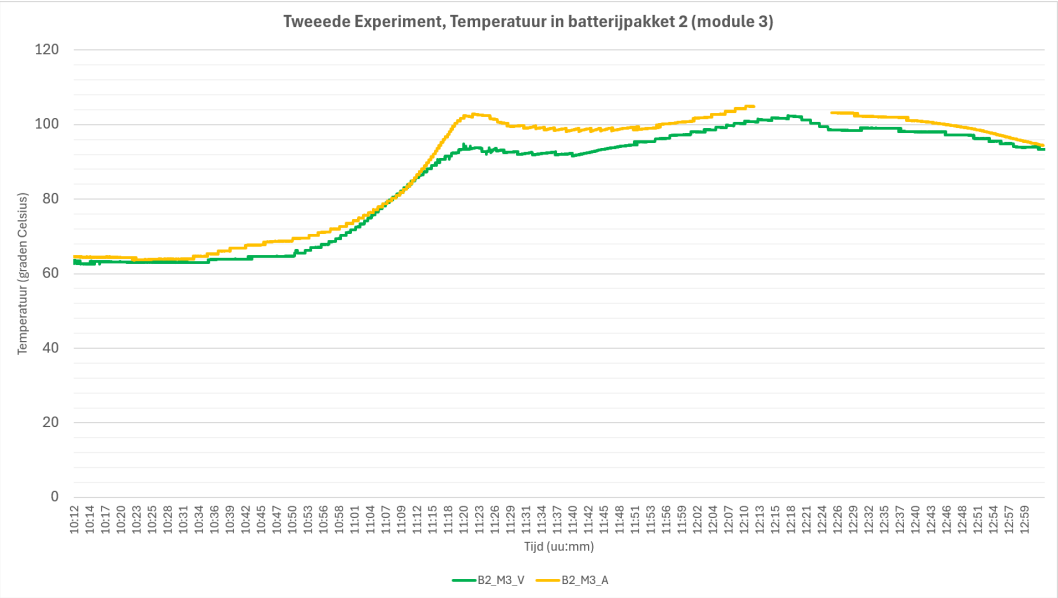
Bij de grafieken van het tweede experiment wordt in hoofdstuk 6 een toelichting gegeven. Een analyse van de metingen van beide experimenten in samenhang wordt gegeven in hoofdstuk 7.

B9.2.1 Batterijpakket 2 (chauffeurszijde voor)

In Figuur B9.4 zijn de temperatuurmetingen weergegeven in batterijpakket 2, module 1 en module 2 tijdens het tweede experiment. Dit waren respectievelijk de onderste en middelste module, waarin beide thermal runaway was genitreerd en de UHD-inzetten hebben plaatsgevonden. In Figuur B9.5 zijn de temperatuurmetingen weergegeven in baterijpakket 2, module 3.



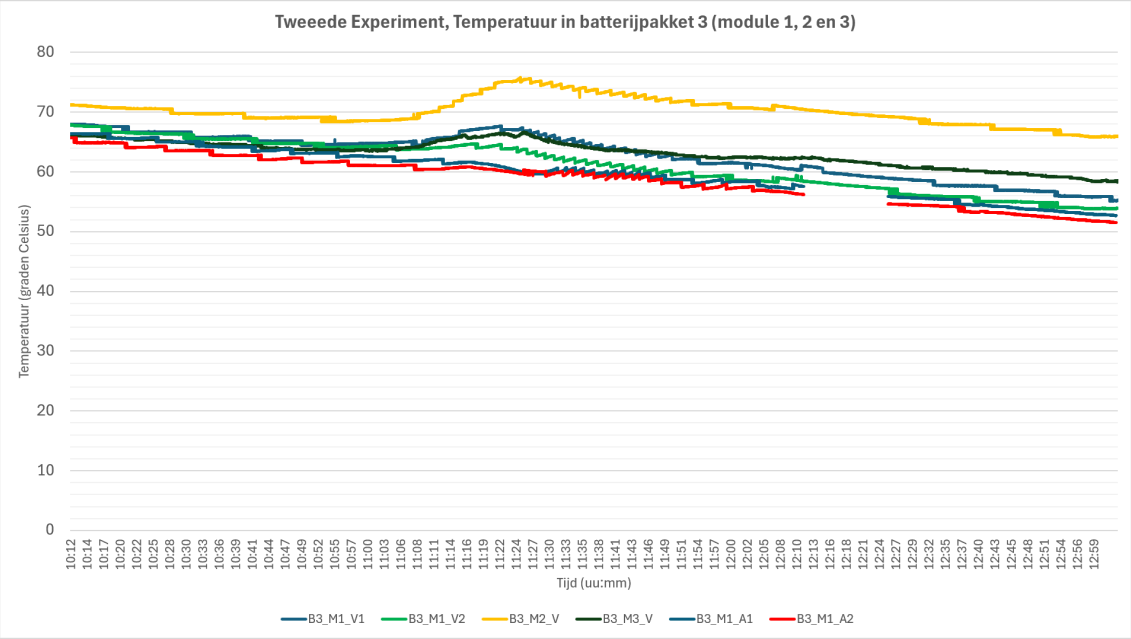
Figuur B9.4 Temperatuurmetingen tweede experiment batterijpakket 2, module 1 en 2



Figuur B9.5 Temperatuurmetingen batterijpakket 2, module 3

B9.2.2 Batterijpakket 3 (chauffeurszijde achter)

In Figuur B9.6 zijn de temperatuurmetingen weergegeven van alle modules in batterijpakket 3 tijdens het tweede experiment.



Figuur 9.6 Temperatuur in batterijpakket 3, module 1, 2 en 3

Bijlage 10 Reflectie op beheersmaatregelen en aandachtspunten

Onderstaand overzicht bevat voor alle beheersmaatregelen en aandachtspunten uit de expertsessie in hoofdstuk 4 een reflectie op basis van de resultaten van de uitgevoerde praktijkexperimenten met UHD-inzet op batterijpakketten van elektrische vrachtwagens.

Risico	Beheersmaatregelen en aandachtspunten
1. Fakkels uit de batterij	a. Informeer en observeer waar tijdens de reguliere blussing steekvlammen zijn waargenomen om de ventilatieopeningen te lokaliseren. *Tijdens het experiment kwamen batterijgassen en vlammen langs kieren en naden aan de randen van het batterijpakket vrij. De UHD-bediener werkte met een lans met verlengstuk (Cobra, totale lanslengte 135 cm) of lange lans (Coolfire, totale lanslengte 130 cm) en penetreerde in het midden van het pakket, en bleef zodoende op enige afstand van de kieren en naden.* b. Inzet van lagedrukstraal tussen vrachtwagen en lansbediener. *Deze maatregel is getest en daarbij bleek dat positionering (back-up) van een lagedrukstraal uitvoerbaar als veiligheids-maatregel voor afscherming tegen effecten vanuit het batterijpakket.* c. Voorkom zo veel mogelijk dat de lansbediener voor opening in het accupakket staat tijdens de UHD-inzet (90 graden op het pakket). *Deze maatregel had betrekking op een serviceluik dat zich aan de zijkant van het batterijpakket bevond; tijdens de UHD-inzet is niet vanaf deze zijde ingezet.*
2. Warmtestraling en hitte van de brand	a. Draag de standaard PBM voor brand. *De standaard PBM zijn ingezet.* b. Zorg ervoor dat de blootstellingstijd zo kort mogelijk is. *De warmtestraling was niet dusdanig groot dat dit tot problemen leidde bij het experiment. Bij grote effecten kan het nodig zijn om extra afstand te nemen of tijdelijk terug te trekken en de voertuigbrand (opnieuw) te bestrijden.* c. Voorkom contact met hete onderdelen. *Bij de brandweermensen zijn geen knelpunten ten aanzien van hete onderdelen naar voren gekomen. Bij het monteren van hulpstukken op het batterijpakket is het wel belangrijk om hier aandacht voor te houden.* d. Op afstand kan blussing uitgevoerd worden als handstralen niet mogelijk zijn door warmtestralingscontouren. *Hiervan was geen sprake tijdens de experimenten, maar het kan relevant zijn bij incidenten met een hogere warmtestraling.*

Risico	Beheersmaatregelen en aandachtspunten
3. Ophoping van brandbare gassen in de batterijmodule of het batterijpakket	a. Tijdens de test zullen zowel in als buiten het batterijpakket de gassen ontstoken worden om explosiegevaar zoveel mogelijk te voorkomen. *In beide experimenten zijn de vrijgekomen gassen door een externe ontstekingsbron ontstoken: in het eerste experiment met een bougie en in het tweede experiment handmatig met een gasbrander.* b. Bij grote uitstroom, flinke steekvlammen, etc. terugtrekken tot de situatie weer als veilig wordt beschouwd. *Hiervan was geen sprake tijdens het experiment, maar deze maatregel kan wel nodig zijn bij praktijkincidenten.* c. Inzet lagedrukstraal tussen vrachtwagen en lansbediener bij eventuele ontsteking. *Deze lagedrukstraal stond gereed tijdens het experiment. Daarmee lijkt het positioneren (back-up) van een lagedruk-straal als back-up een toepasbare veiligheidsmaatregel voor afscherming tegen effecten vanuit het batterijpakket.* d. Gebruik van ventilatoren om gassen weg te blazen. *Ventilatoren zijn bij beide experimenten toegepast en bleken praktisch inzetbaar.*
4. Ophoping van explosieve gassen in cabine of laadruim	a. Bij grote uitstroom en/of flinke steekvlammen terugtrekken. *Tijdens de experimenten was toepassing van deze maatregel niet vereist, maar bij praktijkincidenten kan dit wel het geval zijn.* b. Bij de test zullen zowel in als buiten het batterijpakket de gassen ontstoken worden om explosiegevaar zoveel mogelijk te voorkomen. *In beide experimenten zijn de vrijgekomen gassen door een externe ontstekingsbron ontstoken: in het eerste experiment met een bougie en in het tweede experiment handmatig met een gasbrander.* c. Als de gassen niet ontbranden: maak gebruik van natuurlijke ventilatie, de overdrukventilator of het UHD-blussysteem om het gas weg te ventileren. *Door de handmatige ontsteking was sprake van ontbranding. Desondanks bleven de ventilatoren in werking om toxische gassen af te voeren. Hoewel na de handmatige ontsteking geen sprake meer was van explosiegevaar tijdens de experimenten, blijft deze maatregel bij praktijkincidenten wel relevant.*
5. Fysische explosie van voertuigonderdelen	a. Tijdens de testen zijn de banden drukloos en worden waar nodig gekoeld met een lagedrukstraal. *De banden waren vooraf drukloos gemaakt. Tijdens het experiment zijn met betrekking tot de banden geen bijzonderheden opgetreden. Koelen is zeker noodzakelijk bij praktijkincidenten, omdat daar de banden doorgaans wel onder druk staan.* b. Tijdens de testen zijn zo veel mogelijk drukhouders verwijderd, of is inzichtelijk gemaakt waar ze zich bevinden. *Bij de experimenten waren drukhouders vooraf verwijderd. Bij een praktijkincident is het noodzakelijk om hier alert op te zijn*

Risico	Beheersmaatregelen en aandachtspunten
	en maatregelen te treffen, bijvoorbeeld lagedrukstralen in te zetten voor afscherming van de UHD-bediener of koeling. c. Continu monitoren op opwarming van deze onderdelen en indien nodig koelen met een lagedrukstraal. *Tijdens het experiment was inzet voor koeling niet noodzakelijk. Het gereed laten staan van back-upstralen was echter wel geoefend en bleek uitvoerbaar.*
6. Toxische blootstelling	a. Draag de standaard persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM) voor brand, inclusief ademlucht. Bij voorkeur droge persoonlijke beschermingsmiddelen. Werk indien mogelijk bovenwinds. *Tijdens het experiment is bovenwinds gewerkt en zijn alle PBM's gedragen. In situaties waarin bovenwinds werken niet mogelijk is, verdienen de overige maatregelen extra aandacht en dient overwogen te worden door de dienstdoende bevelvoerder en/of Officier van Dienst of de alternatieve inzetplek verantwoord is.* b. Maak gebruik van de overdrukventilator. *Tijdens het experiment waren ventilatoren aanwezig. Hierbij is opgemerkt dat het gebruik van elektrische ventilatoren de geluidshinder aanzienlijk beperkt.* c. Overweeg het advies van een AGS. > *Tijdens het experiment was geen AGS als onderdeel van de brandweerploeg ingezet. Wel was een veiligheidsfunctionaris aanwezig die was opgeleid als AGS, maar deze vervulde tijdens het experiment uitsluitend de rol van veiligheidsfunctionaris.* d. Volg de juiste stappen (zie procedure) voor ontsmetting (arbeidshygiëne). *Aflossen van de brandweerploeg is na het experiment conform de geldende procedures voor arbeidshygiëne gedaan; hierbij zijn geen bijzonderheden opgetreden.* e. Zorg ervoor dat de blootstellingstijd zo kort mogelijk is. *Dankzij het bovenwinds werken tijdens het experiment was de blootstelling beperkt, verder is deze maatregel altijd aan te raden.* f. Gebruikmaken van barrière, pallet of anderszins door de lansbediener, zodat deze niet continu in (vervuild) bluswater zit met de knieën. *Tijdens het experiment waren er hulpmiddelen voor de UHD-bediener bestaande uit rubberen tegels en/of een krat waarop hij kon zitten en een goede werkhouding kon aannemen.*
7. Ecologische risico's	a. Beperk, na het afblussen van het voertuig, de hoeveelheid water om het accupakket te koelen. *Tijdens het experiment is na afloop van de UHD-inzetten geen aanvullend bluswater meer ingezet voor de koeling van het batterijpakket. Het batterijpakket is vervolgens op natuurlijke wijze door de omgevingslucht afgekoeld.* b. Beperk vervuiling van bodem en oppervlaktewater door bijvoorbeeld het dichten van putten van het (hemelwater)riool. *Tijdens het experiment werd voorkomen dat verontreinigd bluswater in de omgeving terechtkwam door het riool af te*

Risico		Beheersmaatregelen en aandachtspunten
		sluiten en het bluswater gecontroleerd af te voeren. In praktijksituaties kan, afhankelijk van de omstandigheden ter plaatse, worden bezien welke maatregelen mogelijk zijn om verspreiding van verontreinigd bluswater te voorkomen of te beperken. c. Tijdens de test wordt het water opgevangen. *Tijdens het experiment is deze maatregel toegepast. Het bluswater is opgevangen en conform de geldende richtlijnen afgevoerd.*
8.	Elektrische schok	a. Zorg dat de lansbediener geen contact maakt met de metalen onderdelen van het UHD-blussysteem. *De UHD-bediener kon bij een goede werkhouding grip houden op de kunststof handvatten van het UHD-blussystemen en daarmee elektrisch geïsoleerd werken.* b. Bij normaal gebruik wordt de UHD-bediener niet blootgesteld aan elektrische spanning, vanwege het zwevend net en de elektrisch geïsoleerde behuizing van de handgrepen van het UHD-blussysteem. *Tijdens het experiment zijn geen aanwijzingen gevonden dat de UHD-bediener werd blootgesteld aan elektrische spanning.* c. Koppel het voertuig veilig los van de laadpaal. *Tijdens het experiment was geen laadvoorziening aangesloten. In andere situaties is dit aan te raden, mits het veilig kan.* d. Schakel het laadstation af. *Tijdens het experiment was geen laadstation aanwezig. In andere situaties is dit aan te raden mits dit veilig kan.*
9.	Onveilige werkomgeving	a. Geen inzet als er geen veilige werkplek gecreëerd kan worden. *Tijdens de experimenten is zowel door de OvD, bevelvoerders als aanwezige veiligheidsfunctionarissen toegezien op een veilige werkplek, voor en tijdens de brandweerinzet. Er was geen aanleiding om de inzet te staken.* b. Bekijk het CRS van tevoren om risico's in kaart te brengen en de veiligheid van de werkplek te beoordelen. *CRS-kaarten van de situatie waren beschikbaar. Het nadeel is dat de configuratie van de individuele batterijmodules binnenin een batterijpakket hierop niet zichtbaar zijn.* c. Defensief optreden, mogelijk afbrandscenario. *Dit was niet wenselijk tijdens het experiment, maar afhankelijk van de omgeving kan hier in andere situaties wel voor gekozen worden.* d. Geen UHD-inzet als er geen overzicht is van de situatie. *Tijdens het experiment was er voldoende overzicht van de situatie. Het testvoertuig en het batterijpakket konden vanuit verschillende posities worden geobserveerd, de geplande handelingen waren vooraf bekend en aanvullende informatie was beschikbaar via thermokoppels en dronebeelden. In andere situaties, waarin het overzicht beperkt is of onzekerheid bestaat over de aard en omvang van het incident, kan terughoudendheid met een UHD-inzet passend zijn totdat een beter beeld van de situatie is verkregen.*

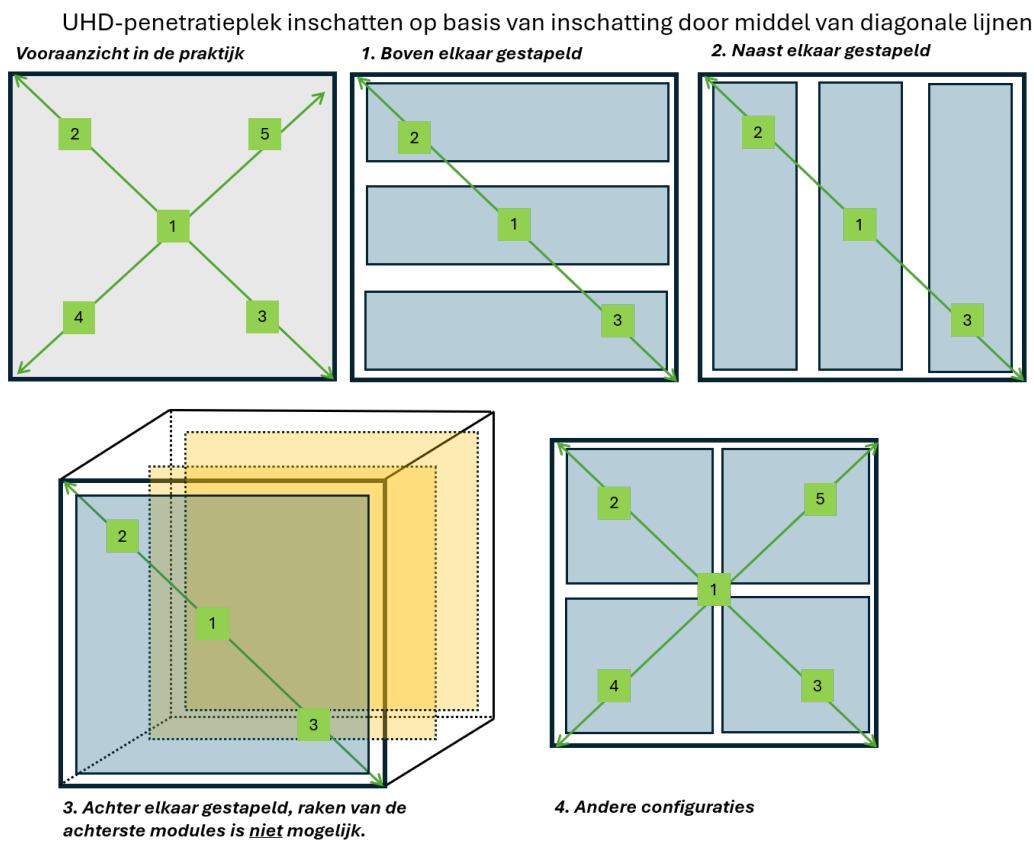
Risico	Beheersmaatregelen en aandachtspunten
	e. Overweeg ondersteuning van Team Digitale Verkenning. *Team Digitale Verkenning was aanwezig bij het praktijkexperiment. De dronebeelden boden ondersteuning bij het in kaart brengen van de situatie, terwijl warmtebeelden hielpen bij het lokaliseren van de module in thermal runaway.*
10. Geen overzicht door meerdere batterijen in thermal runaway	a. Geen UHD-inzet als er geen overzicht is van de situatie. *Tijdens het experiment was er voldoende overzicht van de situatie. Het testvoertuig en het batterijpakket konden vanuit verschillende posities worden geobserveerd, de geplande handelingen waren vooraf bekend en aanvullende informatie was beschikbaar via thermokoppels en dronebeelden. In andere situaties, waarin het overzicht beperkt is of onzekerheid bestaat over de aard en omvang van het incident, kan terughoudendheid met een UHD-inzet passend zijn totdat een beter beeld van de situatie is verkregen.* b. Defensief optreden, mogelijk afbrandscenario. *Dit was niet wenselijk tijdens het experiment, maar afhankelijk van de omgeving kan hier in andere situaties wel voor gekozen worden.* c. Overweeg ondersteuning van Team Digitale Verkenning. *Team Digitale Verkenning was aanwezig bij het praktijkexperiment. De dronebeelden boden ondersteuning bij het in kaart brengen van de situatie, terwijl warmtebeelden hielpen bij het lokaliseren van de module in thermal runaway.*
11. Hotspots zijn niet te lokaliseren	a. Verwijder de buitenste beplating indien dit veilig kan. *Met buitenste beplating wordt hierbij bedoeld aanvullende beplating of een afdekkap vóór het batterijpakket. Deze was bij het testvoertuig niet aanwezig, waardoor deze maatregel niet is getest. In andere situaties kan het verwijderen van dergelijke beplating de toegankelijkheid van het batterijpakket verbeteren, mits dit veilig kan worden uitgevoerd.* b. Indien locatie niet bekend: start blussing in de middelste module. *Uit de analyse lijkt dat meerdere penetratiepogingen mogelijk zijn, waarbij in de middelste module vanuit geometrisch oogpunt een logische plek is om te starten. Zie hiervoor de overwegingen onderaan deze tabel.*
12. UHD-inzet faalt	Stop de UHD-blussing en overweeg: a. Het kapot spuiten van de batterij-cellen met UHD-blussysteem (en eventueel grit) *Tijdens het experiment is deze maatregel niet uitgevoerd. De waarneming dat het niet mogelijk was gericht individuele cellen te raken, geeft echter aanleiding te veronderstellen dat de uitvoerbaarheid van deze maatregel beperkt kan zijn.* b. Inzet lagedrukstraal *De inzet van een lagedrukstraal is alleen aan te raden als afscherming tegen effecten vanuit het batterijpakket. Als er echter een opening of beschadiging is ontstaan in het batterijpakket, zou met een lagedrukstraal wel water kunnen worden ingebracht.* c. Afbrandscenario batterij

Risico	Beheersmaatregelen en aandachtspunten
	Dit was niet wenselijk tijdens het experiment, maar afhankelijk van de omgeving kan hier in andere situaties voor gekozen worden. d. Dompelen van batterijpakket, wanneer dit veilig mogelijk is. *In beide experimenten was een UHD-inzet veilig mogelijk, waardoor het dompelscenario niet aan de orde was. Daarnaast waren de batterijpakketten voor de experimenten los van het testvoertuig opgesteld, terwijl deze in de praktijk onderdeel uitmaken van de vrachtwagen. Het dompelen van (batterijpakketten van) een elektrische vrachtwagen is daardoor in praktijksituaties in principe niet uitvoerbaar.*
13. Fysische explosie door stoomuitzetting in het batterijpakket	a. Onderbreek het gebruik van het UHD-blussysteem. Bijvoorbeeld 15 seconden aan, even uit, effect controleren, nog eens 15 seconden, om het wel of niet uittreden van stoom te kunnen waarnemen. *Tijdens het experiment zijn geen aanwijzingen voor dit effect waargenomen en is het effect zelf ook niet opgetreden. Hierdoor is deze veiligheidsmaatregel niet noodzakelijk geweest en kon de praktische toepassing ervan niet worden beoordeeld.*

Overwegingen bij aandachtspunt 11.b over het bepalen van de penetratieplek op basis van inschatting

Wanneer de juiste penetratieplek niet met voldoende zekerheid kan worden vastgesteld, kan worden overwogen meerdere penetratiepogingen uit te voeren op de meest waarschijnlijke locaties. Een dergelijke aanpak brengt echter het risico met zich mee dat een niet-geïnitieerde module wordt geraakt. Tijdens het eerste experiment leidde dit tot thermal runaway van de direct getroffen cellen, maar niet tot verdere thermische propagatie binnen de betreffende module. Mogelijk werd verdere escalatie beperkt door de directe koeling van het UHD-blussysteem. Deze bevinding is echter gebaseerd op één enkele waarneming binnen het experiment. Uit praktijkervaringen tot nu toe binnen UHD-eenheden blijkt verder dat het kapot spuiten van een “gezonde cel” bij elektrische personenauto’s doorgaans niet leidt tot thermische propagatie (R. Turkenburg, persoonlijke communicatie, 8 september 2026).

Vanuit geometrisch oogpunt lijkt een benadering waarbij opeenvolgende penetratiepogingen diagonaal over het batterijpakket worden verspreid, bijvoorbeeld via een centrale positie gevolgd door locaties linksboven en rechtsonder (en eventueel rechtsonder en linksboven), de kans te vergroten dat de module in thermal runaway wordt geraakt. Een schematische weergave hiervan is opgenomen in Figuur B10.1.



Figuur B10.1 In deze figuur is op basis van geometrie te zien dat door het toepassen van diagonale lijnen het aannemelijk is dat afhankelijk van de configuratie van de batterijmodules binnen drie tot maximaal vijf pogingen de module in thermal runaway wordt geraakt, of dat wordt geconstateerd dat deze fysiek onbereikbaar is.