



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Meetresultaten bij branden met elektrische voertuigen en gebruik van ultrahogedruk snij- en blussystemen

Onderzoek van rook, depositie en bluswater

Meetresultaten bij branden met elektrische voertuigen en gebruik van ultrahogedruk snij- en blussystemen

Onderzoek van rook, depositie en bluswater

RIVM-briefrapport 2025-0072

Colofon

© RIVM 2025

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

DOI 10.21945/RIVM-2025-0072

N.W. van Veen (auteur), RIVM
E.M. van Putten (auteur), RIVM
F. Bakker (auteur), RIVM
M.E. Boshuis-Hilverdink (auteur), RIVM
P.A.M. Heezen (auteur), RIVM

Contact:
Niels van Veen
Milieu en Veiligheid MVS-VLH
niels.van.veen@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het Departementaal Coördinatiecentrum Crisisbeheersing van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (DCC-IenW) in het kader van kennisopbouw incidenten.

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Meetresultaten bij branden met elektrische voertuigen en gebruik van ultrahogedruk snij- en blussystemen

Onderzoek van rook, depositie en bluswater

Bij elektrische voertuigen is de batterij afgeschermd door een waterdichte kuip. De brandweer zet een brandend elektrisch voertuig nu vaak in een grote container onder water of laat het gecontroleerd uitbranden. Om dit blusproces te verbeteren is een nieuwe methode ontwikkeld met het ultrahogedruk (UHD) snij- en blussysteem. Hiermee kan door de auto heen worden gesneden, zodat het bluswater de brandende batterij kan bereiken.

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV) heeft deze blusmethode getest met twee brandproeven met elektrische voertuigen. Het RIVM heeft hierbij gemeten welke stoffen in bluswater, rook en deeltjes zitten die in de omgeving zijn neergedaald. Het gaat om deeltjes die kleiner zijn dan ongeveer 2 millimeter.

De metingen laten zien dat er veel kleine schadelijke deeltjes in de rook zitten, die in de omgeving kunnen neerdalen. Hierdoor is het belangrijk er rekening mee te houden dat oppervlakken dicht bij de brand vervuild kunnen raken. Dit geldt vooral voor branden van grote batterijen. Net als bij de meeste branden is de stof koolmonoxide het gevaarlijkste rookgas.

Verder blijkt dat bij de UHD-methode veel schadelijke stoffen uit de batterij kunnen vrijkomen, zoals de zware metalen kobalt en nikkel. Deze deeltjes kunnen met het bluswater op de bodem rond het voertuig terecht komen en verder in de omgeving. Hierdoor kan de bodem zo vervuild raken dat hij volgens de wet moet worden gesaneerd.

Zware metalen zijn ook schadelijk voor oppervlaktewater wanneer ze via het riool in een plas of sloot terecht komen. In zeldzame gevallen kunnen mensen huidletsels krijgen als ze met de vervuiling in contact komen. Dat kan gebeuren als de bodem na het gebruik van het UHD-systeem niet wordt schoongemaakt en schadelijke stoffen op de bodem achterblijven.

Het RIVM raadt daarom aan om er vóór het gebruik de UHD-methode rekening mee te houden dat sterk vervuild bluswater vrijkomt. Het RIVM beveelt aan de methode verder te ontwikkelen. Als het vervuilde UHD-bluswater kan worden opgevangen, kunnen zowel gevaarlijke situaties voor mensen in de omgeving als milieuvervuiling worden voorkomen.

Kernwoorden: ultrahogedruk snij- en blussysteem, UHD, brandexperiment, schadelijke stoffen, branden elektrische voertuigen, li-ion-batterijen, rook, depositie, bluswater

Synopsis

Measurement results for deployment of UHP extinguishing systems in EV fires

Examination of smoke, deposition and firefighting water

The batteries in electric vehicles (EVs) have a waterproof shield around them to protect them from water. To extinguish a fire in an EV, firefighters often have to submerge the entire vehicle in a large container or allow it to burn out. A new method has been developed to improve this extinguishing process, using an ultra high pressure (UHP) extinguishing system. This system is able to penetrate an EV, allowing the firefighting water to reach the burning battery.

The Netherlands Institute for Public Safety (NIPV) has tested this extinguishing system in two fire experiments involving EVs. RIVM measured the substances that were present in the firefighting water, smoke and particles deposited in the surrounding area. These particles were smaller than around 2 millimetres in size.

The measurements showed that the smoke contained many harmful particles that could be deposited in the surrounding area. This makes it important to take into account that surfaces close to the fire can become contaminated, particularly in fires involving large batteries. As in most fires, carbon monoxide turned out to be the most hazardous flue gas.

RIVM also found that the UHP method may cause the battery to release many hazardous substances, such as the heavy metals cobalt and nickel. These particles may end up in the soil around the vehicle and in the wider surrounding area through the firefighting water. This could result in the soil becoming contaminated to such an extent that it must be remediated under the law.

Heavy metals also pose a hazard to surface water when they end up in a body of water or watercourse through the sewer. In rare cases, people may suffer skin lesions when coming into contact with the contaminated water. This may occur if the soil is not cleaned up after deployment of the UHP extinguishing system, leading to hazardous substances remaining in the soil.

Accordingly, RIVM recommends taking into account the possible release of heavily contaminated firefighting water when considering deploying the UHP extinguishing system. RIVM also recommends further development of the UHP method. Collecting the contaminated UHP firefighting water could avoid hazardous situations for people living in the surrounding area as well as environmental pollution.

Keywords: ultra high pressure extinguishing system, UHP, fire experiment, hazardous substances, electric vehicle fires, li-ion batteries, smoke, deposition, firefighting water

Inhoudsopgave

Samenvatting — 11

Summary — 17

1 Leeswijzer — 23

2 Aanleiding — 25

3 Doelstelling — 27

4 Methode — 29

4.1 Opzet en uitvoering experiment — 29

4.2 Meet-en monsternamemethode — 31

4.3 Meteo en omgevingsomstandigheden — 32

4.4 Operationele beperkingen — 33

4.5 Brandverloop en rookverspreiding — 34

4.5.1 Algemeen — 34

4.5.2 Verschil in brandverloop en monsternamemethode experiment 1 en 2 — 34

4.5.3 Brandverloop experiment 2 — 34

5 Meetresultaten en analyse rook — 37

5.1 Omstandigheden — 37

5.2 Gassen — 37

5.2.1 Inleiding — 37

5.2.2 Gasmetingen experiment 1 — 39

5.2.3 Gasmetingen experiment 2 — 40

5.2.4 Algemene toelichting bij gemeten waarden experiment 2 — 42

5.2.5 Onvolledige verbranding en CO₂-CO ratio tijdens experiment 2 — 43

5.2.6 Vergelijking gasconcentraties experiment 2 met interventiewaarden — 46

5.2.7 Fluorwaterstof emissies — 49

5.3 Rookstofconcentraties — 49

5.3.1 Bemonsteringsomstandigheden — 49

5.3.2 Elementen — 50

5.3.3 Anionen — 51

6 Meetresultaten depositie — 53

6.1 Verschil in depositie tussen experiment 1 en 2 — 53

6.2 Depositie elementen experiment 1 en 2 — 53

6.3 Depositie anionen experiment 1 en 2 — 55

6.4 Massaverhouding anionen-elementen experiment 2 — 56

6.5 Verhoging pH in depositie — 56

7 Meetresultaten bluswater — 57

7.1 Omstandigheden — 57

7.2 Visuele weergave gehalte per bluswatermonster — 58

7.3 Elementen — 60

7.4 Anionen — 62

8	Analyse en discussie rookstof en depositie — 63
8.1	Algemeen — 63
8.2	Verschillen samenstelling in rookstof en depositie — 63
8.2.1	Meetwaarden in molverhouding — 63
8.2.2	Emissiesnelheid bij thermal runaway — 65
8.2.3	Verschil in deeltjesgrootte en samenstelling rookdeeltjes — 66
8.2.4	Conclusie verschillen samenstelling rookstof en depositie — 67
8.3	Samenstelling geëmitteerd lithium en kathodemateriaal — 67
9	Analyse en discussie bluswater — 71
9.1	Algemeen — 71
9.2	Emissies lithium, nikkel, mangaan, kobalt en deeltjesgrootte-verdeling — 71
9.3	Vergelijking bluswaterconcentraties NMC batterijen — 75
9.4	Schatting theoretische hoeveelheid vrijgekomen deeltjes — 77
9.5	Schatting emissies bluswater bij experiment 1 en 2 — 79
9.5.1	Variabelen bij bluswateremissies — 79
9.5.2	Schatting hoeveelheid vrijgekomen lithium bij experiment 2 — 79
9.5.3	Aannames bij schatting van hoeveelheid kathodemetalen in bluswater — 80
9.5.4	Schatting emissie NMC kathodemateriaal op basis van molverhouding — 80
9.5.5	Schatting emissie NMC kathodemateriaal op basis van theoretische maximale emissie uit Tabel 18. — 80
9.5.6	Conclusie schatting emissies bluswater — 81
9.5.7	Schatting hoeveelheid anionen bij experiment 1 en 2 — 82
9.6	Verhouding bluswateremissies tot bodemnormen — 82
9.6.1	Achtergrondinformatie over bodemnormen — 82
9.6.2	Vertaling bodemnormen naar impact bij emissies — 83
9.6.3	Conclusie verhouding bluswateremissies tot bodemnormen — 85
9.7	Bluswaterlozing in riool en open water — 86
9.7.1	Eindpunt van bluswater na lozing in het riool — 86
9.7.2	Overwegingen bij lozing op een regenwaterriool met uitstroom naar open water — 87
9.7.3	Overwegingen bij het lozing op een RWZI — 89
9.8	Vergelijking depositiewaarden met emissies door UHD-inzet — 90
9.9	Vergelijking meetwaarden dompelcontainer met UHD-inzet — 92
10	Conclusies — 93
10.1	Algemeen — 93
10.2	Rook — 93
10.3	Depositie — 94
10.4	Bluswater bij gebruik UHD-systeem — 95
11	Aanbevelingen — 97
	Dankwoord — 101
	Literatuur — 103
	Afkortingenlijst — 105
	Bijlage 1 Meetwaarden bluswater in dompelcontainer — 107

Bijlage 2 Brandverloop experiment 1 — 109

Bijlage 3 Visuele weergave depositie metingen — 111

Bijlage 4 Totaal metaal emissies van rook — 113

Bijlage 5 Li-ion-batterijen in een notendop — 115

Bijlage 6 Monsternamen en analyse methode — 119

Bijlage 7 Meetresultaten bluswater alle elementen — 120

Samenvatting

Aanleiding

Het wagenpark in Nederland bestaat voor een steeds groter deel uit elektrische voertuigen. Hierdoor wordt de kans groter dat elektrische voertuigen bij een brand betrokken raken. Batterijen van elektrische voertuigen zijn over het algemeen lastig te blussen. Dit komt mede doordat de batterij vaak in een waterdichte behuizing onder het voertuig is geplaatst. Tot dit onderzoek gebruikte de brandweer bij brand in een elektrisch voertuig vaak twee inzetmethoden: de brand gecontroleerd laten uitbranden of het voertuig in een zogenaamde dompelcontainer met water plaatsen. Beide methoden hebben nadelen, waardoor het wenselijk was naar alternatieven te zoeken. Een ultrahogedruk (UHD) snij- en blussysteem vormt een alternatieve oplossing. Dit systeem kan door de voertuigcarrosserie snijden om de brandhaard in de batterijbehuizing te bereiken en deze vervolgens met water te blussen. Om een veilige UHD-blusmethode te ontwikkelen en te testen heeft het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV) in 2024 in samenwerking met een aantal partners¹ twee brandexperimenten met elektrische voertuigen uitgevoerd. Het RIVM is hierbij uitgenodigd om metingen te verrichten.

Doelstelling

Voor het RIVM boden de brandproeven gelegenheid om informatie te verzamelen over een aantal vraagstukken met betrekking tot branden van elektrische voertuigen met li-ion-batterijen, te weten: 1. Risico's van rook voor de omgeving, 2. Effecten van depositie in het benedenwinds gebied en 3. Effecten van de inzet van een UHD-systeem op het bluswater.

Methode

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV) en betrokken partners hebben twee brandexperimenten uitgevoerd met elektrische voertuigen (volledig geladen batterij met een capaciteit van 75 kWh, type NMC² li-ion-batterij). De voertuigen werden geblust met een UHD-snij- en blussysteem. De experimenten werden uitgevoerd in de buitenlucht, wat de mogelijkheid bood om onder de heersende weersomstandigheden (gemiddelde windsnelheid 5-7 m/s) een realistisch beeld te krijgen van de rookconcentraties in de rookpluim. Het RIVM heeft direct benedenwinds van de brand rookgasmetingen uitgevoerd en monsters genomen van zowel rookstof, bluswater als depositie van rookstofdeeltjes op de bodem.

Resultaten en conclusies

Dit RIVM rapport beschrijft de bevindingen van rookgasmetingen, depositie en gevolgen voor het bluswater. Hierbij ligt de focus op het

¹ Leverancier van de voertuigen, Duitse werkgroep VDA/VDIK, Brandweer Amsterdam Airport Schiphol, Veiligheidsregio Haaglanden en Utrecht, brandweer Amsterdam-Amstelland, Coldcut systems, TATA Steel en de Gezamenlijke Brandweer.

² Li-ion-batterijtypen met nikkelmangaankobaltoxide (NiMnCoO₂) kathode

tweede experiment. Bij dit experiment waren de meetomstandigheden gunstig, waardoor representatieve meetdata kon worden verkregen. Bij het eerste experiment is op sommige vlakken onvoldoende representatieve data verzameld om een goed beeld te vormen.

Rook en depositie

De concentraties van schadelijke gassen overschreden bij het tweede experiment kortdurend (5-17 minuten) de interventiewaarden³. Dit ging voornamelijk om interventiewaarden waarbij inademing van deze gassen lichte gezondheidsklachten kan veroorzaken. De gemeten stoffen zijn onder andere fluorwaterstof (HF, maximaal 2 ppm), chloorwaterstof (HCl, maximaal 5 ppm), cyaanwaterstof (HCN, maximaal 5 ppm) en formaldehyde (HCOH, maximaal 10 ppm).

Voor het toxische gas koolmonoxide (CO, maximaal 318 ppm) werden gedurende korte tijd concentraties gemeten die overeenkomen met interventiewaarden waarbij ernstige gezondheidsklachten kunnen optreden (AGW⁴). Hoewel de duur van de gemeten CO concentraties relatief kort was, kunnen ernstige gezondheidseffecten niet worden uitgesloten bij langdurige blootstelling aan deze rook. Daarnaast kunnen sommige toxische stoffen elkaars schadelijke werking versterken. Bovendien bevat de rook een aanzienlijke hoeveelheid schadelijke en irriterende deeltjes. Hierdoor kan blootstelling leiden tot grotere gezondheidseffecten dan op basis van de afzonderlijke gasconcentraties zou worden verwacht. De gemeten concentraties fluorwaterstof (HF) vormen, vergeleken met andere schadelijke stoffen, niet het meest relevante gezondheidsrisico.

Bluswerkzaamheden zorgen direct benedenwinds voor een aanzienlijke toename van concentraties schadelijke stoffen. Dit is een gevolg van blussen in het algemeen en niet kenmerkend voor inzet van UHD-systemen. Deze toename ontstaat enerzijds doordat de rookgassen kouder worden waardoor ze minder goed opstijgen. Hierdoor nemen de rookgasconcentraties benedenwinds op leefniveau toe. Anderzijds vindt er door blussing meer onvolledige verbranding plaats. Hierdoor komen beduidend meer schadelijke stoffen vrij. Door onvolledige verbranding zijn na blussing aanzienlijk hogere concentraties koolmonoxide (CO), cyaanwaterstof (HCN) en formaldehyde (HCOH) waarneembaar in verhouding tot het moment voor de blussing.

Naast toxische gassen komen er substantiële hoeveelheden rookdeeltjes vrij die schadelijke metaalverbindingen bevatten, zoals kobalt-, nikkel- en lithiumverbindingen. In het benedenwinds gebied worden deze rookdeeltjes als depositie afgezet, wat leidt tot verhoogde concentraties van lithium, nikkel, mangaan en kobalt op de bodem en oppervlakken die met de rook in contact komen. Maximaal aangetroffen hoeveelheden depositie zijn: lithium 24 mg/m², kobalt 56 mg/m² en nikkel 339 mg/m². Depositie daalt hoofdzakelijk neer op die plekken waar de rook recht overheen trekt. Doordat de windrichting en de samenstelling van

³ <https://rvs.rivm.nl/onderwerpen/normen/rampen-en-incidenten/interventiewaarden>

⁴ Alarmeringsgrenswaarde: de luchtconcentratie waarboven onherstelbare of andere ernstige gezondheidseffecten kunnen optreden, of waarbij door blootstelling aan de stof personen minder goed in staat zijn zichzelf in veiligheid te brengen.

de rook tijdens de brand verandert, ontstaan er verschillen in depositiesamenstelling en verspreiding.

Omdat lithium bij vrijkomen hydroxideverbindingen kan vormen, is er onder de rookpluim een verhoging van de pH in depositie waarneembaar. Op de locatie met de hoogste lithiumconcentratie zijn maximaal indicatieve pH-waarden van 9 tot 10 in de depositie gemeten. Uit metingen blijkt dat een verhoging van de pH bij batterijen die nikkel en/of kobalt bevatten, in de praktijk ook een indicatie kan zijn voor verhoogde aanwezigheid van deze metalen in de depositie. Dit is relevant omdat nikkel en kobalt zware metalen zijn die als zeer zorgwekkende stoffen (ZZS⁵) zijn geclassificeerd. Vooral bij herhaalde of langdurige blootstelling kunnen gezondheids- of milieurisico's ontstaan. Nikkel en kobaltverbindingen kunnen zowel kankerverwekkende (carcinogene) eigenschappen hebben als huidirritatie en allergische reacties veroorzaken. Bij branden met grote batterijsystemen kan het zinvol zijn om een pH-verhoging in de depositie indicatief te monitoren, en indien nodig passende maatregelen te nemen om blootstelling aan zware metalen of schade door corrosieve stoffen te beperken.

Bij het vertalen van de meetresultaten van dit experiment op andere branden is belangrijk te benadrukken dat de concentraties en samenstelling van de rook kunnen variëren afhankelijk van het verloop van de brand of de weersomstandigheden. In de praktijk is bij een buitenbrand van een elektrische auto de kans op langdurige blootstelling aan rook voor omstanders vaak gering, omdat de rook als hinderlijk wordt ervaren. Hierdoor zullen mensen geneigd zijn om zich uit de rook te verwijderen.

Bluswater

Uit de experimenten blijkt dat een UHD-blussysteem een effectief middel is om branden in de batterij van elektrische voertuigen te blussen. Een keerzijde van deze techniek is de aanzienlijke hoeveelheid schadelijke stoffen die hierbij vrijkomt. Na het gebruik van het UHD-blussysteem namen de gehalten van schadelijke metalen in het bemonsterde bluswater toe met ongeveer een factor 25 tot 50 vergeleken met de monsters van voor de UHD-inzet. Deze toename van vervuiling is onder andere te verklaren doordat bij thermal runaway⁶ het anode en kathodemateriaal in kleine deeltjes uiteen kunnen vallen. Bij NMC li-ion-batterijen komen daarbij veel nikkel en kobalt vrij. De UHD-blussing kan deze deeltjes uit de batterijbehuizing spoelen, waardoor deze stoffen vrijkomen in de omgeving. Nikkel en kobalt (en verbindingen met deze stoffen) zijn zware metalen die – zoals hierboven beschreven – zijn geclassificeerd als Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS). Deze stoffen zijn gevaarlijk voor mens en milieu. Overheidsbeleid is er op gericht om deze ZZS zoveel mogelijk te weren uit de leefomgeving⁷.

Schattingen van de totale emissies in het bluswater tijdens het tweede experiment, bedragen ongeveer 240 gram lithium, 420 gram kobalt en

⁵ <https://rvs.rivm.nl/onderwerpen/zeer-zorgwekkende-stoffen>

⁶ Een thermal runaway in een li-ion-batterij is een ongecontroleerde temperatuurstijging waarbij warmte door bijvoorbeeld interne kortsluiting, oververhitting of beschadiging zichzelf versterkt, wat uiteindelijk kan leiden tot brand of explosie.

⁷ <https://rvs.rivm.nl/onderwerpen/zeer-zorgwekkende-stoffen>

1300 gram nikkel. Wanneer dergelijke hoeveelheden nikkel en kobalt vrijkomen in de bodem, kunnen bodeminterventiewaarden worden overschreden, wat kan leiden tot een saneringsverplichting. Daarnaast komt bij li-ion-batterij branden veel lithium vrij. Een deel van het lithium kan lithiumhydroxide (LiOH) vormen wat kan bijdragen aan verhoogde pH in bluswater en bodem. Op basis van de gemeten lithiumgehalten in het bluswater van het UHD-systeem (maximaal 286 mg/L) kan niet worden uitgesloten dat het gebruik van dit systeem leidt tot verhoogde hydroxideconcentraties op de grond. Hierdoor is het ook niet uit te sluiten dat er aan de oppervlakte corrosieve omstandigheden kunnen ontstaan. Bij een UHD-blussing op een verharde ondergrond in een bewoonde omgeving, waarbij batterijdeeltjes op de bodem achterblijven, bestaat een kans op blootstelling aan kobalt- en nikkelverbindingen en corrosieve deeltjes, bijvoorbeeld wanneer kinderen op straat spelen. Het voorkomen van blootstelling aan deze stoffen is ook een belangrijk aandachtspunt voor brandweerpersoneel dat het UHD-systeem bedient.

Wanneer de bovengenoemde hoeveelheid metalen via een regenwaterriool in een kleine plas of sloot met beperkte doorstroming terechtkomt, kunnen de indicatieve milieurisicogrenswaarden voor lithium worden overschreden. In zeer kleine plassen kan bovendien de pH-waarde stijgen tot boven de aanbevolen niveaus. Bij bluswateremissies tot ongeveer 240 g lithium wordt verwacht dat de acute effecten van pH-stijging en verhoogde lithiumconcentraties tijdelijk zijn en beperkt blijven als het volume van de plas groter is dan 1000 m³. Echter, wanneer naast lithium ook kobalt- en nikkelverbindingen in het oppervlaktewater terechtkomen, kan dit leiden tot milieuschade en langdurige negatieve effecten op het ecosysteem.

De twee experimenten geven een orde grootte indicatie van de emissie van zware metalen tijdens een brand van een elektrisch voertuig. De emissie naar bluswater tijdens UHD-blusacties blijkt afhankelijk te zijn van veel verschillende factoren, zoals het ladingspercentage, het batterijtype, batterijcapaciteit, het verloop van de brand en de specifieke inzet van het UHD-systeem. Niet al deze variaties konden in de twee experimenten worden meegenomen. Ondanks deze onzekerheden en variaties in emissies zijn er aanwijzingen dat blussen met het UHD-systeem evenveel tot aanzienlijk meer nadelige milieueffecten kan veroorzaken dan het gecontroleerd laten uitbranden van het voertuig. In vergelijking met het gebruik van een dompelcontainer zijn de emissies bij UHD-blussing minder beheersbaar. Bovendien komen bij het gebruik van een dompelcontainer naar verwachting minder slecht wateroplosbare kathodematerialen vrij die potentieel schadelijke zware metalen bevatten.

Vergeleken met een elektrische autobrand kan een traditionele voertuigbrand met verbrandingsmotor eveneens leiden tot het vrijkomen van aanzienlijke hoeveelheden schadelijke koolwaterstoffen. Hoewel koolwaterstoffen in de praktijk doorgaans minder persistent zijn dan zware metalen, kan een traditionele voertuigbrand eveneens leiden tot een noodzaak van sanering.

Bij een UHD-blussing kunnen per brandsituatie grote verschillen zijn in de hoeveelheid schadelijke stoffen die in de omgeving vrijkomen. Omdat bij deze blustechniek vervuiling van de omgeving mogelijk is, is het wenselijk om het bluswater van een UHD-blussing zoveel mogelijk op te vangen om verspreiding van verontreinigende stoffen te voorkomen. Een blusmethode waarbij het UHD-bluswater opgevangen wordt kan resulteren in een effectieve blusmethode die in vergelijking met andere blusmethoden de minste vervuiling oplevert. Het RIVM beveelt daarom aan onderzoek te doen naar manieren om specifiek het UHD-bluswater op te vangen.

In situaties waarin het UHD-bluswater niet wordt opgevangen kunnen in de afhandeling van het incident saneringsmaatregelen voor de bodem en waterafvoersystemen nodig zijn om milieu- en gezondheidsrisico's tot een aanvaardbaar niveau terug te brengen. Het RIVM raadt daarom aan om de gevolgen voor het milieu mee te wegen in de keuze van de blusmethode.

Summary

Background

The number of electric vehicles (EVs) in the Netherlands is on the rise. This increases the chance of EVs becoming involved in a fire. EV battery packs are generally difficult to extinguish. One of the reasons for this is that they are often installed in a waterproof case underneath the vehicle. Before this study was conducted, firefighters commonly tackled EV fires in one of two ways: allow the vehicle to burn out, or submerge the entire vehicle in a submersion container filled with water. Both methods have drawbacks, prompting a demand for alternatives. One such alternative is an ultra high pressure (UHP) extinguishing system. This system is able to penetrate the vehicle bodywork and reach the seat of the fire inside the battery case, so that it can be extinguished with water. In order to develop and test a safe UHP extinguishing method, the Netherlands Institute for Public Safety (NIPV) joined forces with a number of partners⁸ in 2024 to conduct two fire experiments on EVs. RIVM was invited to attend and take measurements.

Objective

For RIVM, the fire experiments provided an opportunity to collect information on a number of issues regarding fires in EVs with Li-ion battery packs: 1. the risks of smoke for the surrounding area, 2. the effects of deposition downwind of the fire and 3. the effects of deploying a UHP extinguishing system on the firefighting water.

Method

The NIPV and its partners conducted two fire experiments on EVs (with fully charged NMC⁹ Li-ion battery packs with a capacity of 75 kWh). The fires in the vehicles were extinguished using a UHP extinguishing system. The experiments were conducted in the open air, which afforded the opportunity to obtain a realistic picture of the concentrations in the smoke plume under the weather conditions in effect at the time (average wind speed of 5–7 m/s). RIVM took flue gas measurements immediately downwind of the fire and took samples of smoke dust, firefighting water and smoke particles deposited onto the soil.

Results and conclusions

This RIVM report describes the flue gas measurement and deposition findings and the effects on the firefighting water. The focus is on the second experiment. This experiment benefited from advantageous measurement conditions, making it possible to obtain representative measurement data. During the first experiment, insufficient representative data was obtained for some aspects to form an accurate picture.

⁸ The supplier of the vehicles, the German VDA/VDIK task force, the Amsterdam Airport Schiphol fire brigade, the Haaglanden and Utrecht security regions, the Amsterdam-Amstelland fire brigade, Coldcut Systems, TATA Steel and the Joint Fire Brigade.

⁹ Li-ion battery types with a nickel manganese cobalt dioxide (NiMnCoO₂) cathode

Smoke and deposition

During the second experiment, the concentrations of hazardous gases briefly (5–17 minutes) exceeded the intervention values.¹⁰ This mainly concerned intervention values at which inhalation of these gases might cause mild health problems. The measured substances included hydrogen fluoride (HF, maximum of 2 ppm), hydrogen chloride (HCl, maximum of 5 ppm), hydrogen cyanide (HCN, maximum of 5 ppm) and formaldehyde (HCOH, maximum of 10 ppm).

For the toxic gas carbon monoxide (CO, maximum of 318 ppm), there were brief periods during which the measured concentrations were equivalent to intervention values at which serious health problems might occur (AGW¹¹). Although the measured CO concentrations were only present for a short time, serious health effects from long-term exposure to this flue gas cannot be ruled out. Furthermore, some toxic substances can reinforce each other's harmful effects. Moreover, the smoke contained a substantial quantity of harmful and irritant particles. As a result, exposure to the smoke may cause more serious health effects than might be expected on the basis of the separate gas concentrations. Compared to the other hazardous substances, the measured concentrations of hydrogen fluoride (HF) did not present the most relevant risk to health.

The fire extinguishing efforts led to a substantial increase in the concentrations of hazardous substances immediately downwind of the fire. This was a consequence of extinguishing a fire in general and not characteristic of the deployment of UHP extinguishing systems. On the one hand, this increase was due to flue gases cooling down. This made it more difficult for them to rise, leading to higher flue gas concentrations at ground level downwind. On the other hand, extinguishing the fire meant more incomplete combustion of – and hence a significant increase in the release of – hazardous substances. As a consequence of incomplete combustion, substantially higher concentrations of carbon monoxide (CO), hydrogen cyanide (HCN) and formaldehyde (HCOH) were detected after extinguishing the fire than before.

In addition to toxic gases, extinguishing the fire caused the release of a substantial quantity of smoke particles that contained harmful compounds of the metals cobalt, nickel and lithium. These smoke particles were deposited downwind of the fire, where they led to increased concentrations of lithium, nickel, manganese and cobalt in the soil and on surfaces that came into contact with the smoke. The maximum deposition amounts found were 24 mg/m² for lithium, 56 mg/m² for cobalt and 339 mg/m² for nickel. Particles were mainly deposited in areas that the smoke passed over in a straight line. Changes in wind direction and the composition of the smoke during the fire led to differences in deposition composition and spread.

¹⁰ <https://rvs.rivm.nl/onderwerpen/normen/rampen-en-incidenten/interventiewaarden>. VRW broadly corresponds to the ERPG-1 and the AGW corresponds to the ERPG-2, whereas ERPG stands for emergency response planning guideline. <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/resources/emergency-response-planning-guidelines-erpgs.html>

¹¹ AGW = *alarmeringsgrenswaarde*, or alert threshold: the concentration in air above which irreparable or other serious health effects may occur, or at which exposure to the substance may impair people's ability to move to a safe location.

Because lithium may form hydroxide compounds upon release, an increase in the pH value of the deposition was detected below the smoke plume. At the location with the highest lithium concentration, the maximum indicative pH values of the deposition that were measured were between 9 and 10. Measurements have shown that an increase in the pH value after a fire involving a battery pack that contains nickel and/or cobalt may in practice be indicative of an increased concentration of these metals in the deposition. This is relevant, because nickel and cobalt are heavy metals classified as substances of very high concern (ZZS¹²). They may pose health and environmental risks, particularly at repeated or prolonged exposure. Nickel and cobalt compounds may have carcinogenic properties and cause skin irritation as well as allergic reactions. In the case of a fire involving a large battery system, it may be useful to perform indicative monitoring of increases in the pH value of the deposition and take suitable measures if necessary to limit exposure to heavy metals or damage caused by corrosive substances.

When it comes to transposing the measurement results of this experiment to other fires, it is important to stress that the concentrations and composition of substances in the smoke may vary, depending on the course of the fire and the weather conditions. In practice, the chance of long-term exposure of bystanders to smoke of an EV fire in the open air is often minimal, because they perceive the smoke as a nuisance and are therefore inclined to move away from it.

Firefighting water

The experiments showed that a UHP extinguishing system is an effective method to extinguish fires in EV battery packs. However, a drawback of this method is the release of substantial quantities of hazardous substances. After deploying the UHP extinguishing system, the concentrations of harmful metals in the firefighting water samples increased by around a factor of between 25 and 50 compared to the samples taken before UHP deployment. This increase in pollutants can partially be explained by the anode and cathode materials decomposing into tiny particles during thermal runaway.¹³ During this process, NMC Li-ion battery packs release large amounts of nickel and cobalt. UHP extinguishing systems may leach these substances from the battery case, so that they end up in the surrounding area. As mentioned previously, nickel and cobalt (and compounds of these substances) are heavy metals classified as substances of very high concern (ZZSs). Such substances are harmful to people and the environment. The aim of government policy in this area is to keep the amount of ZZSs in the environment as low as possible.¹⁴

The total emissions in firefighting water during the second experiment were estimated to be around 240 g for lithium, 420 g for cobalt and 1,300 g for nickel. When such quantities of nickel and cobalt are released into the soil, soil intervention values may be exceeded and the

¹² <https://rvs.rivm.nl/onderwerpen/zeer-zorgwekkende-stoffen>. The Dutch ZZS substances cover a broader range than the Substances of Very High Concern (SVHC) under REACH, they are identified based on the same hazard criteria as the SVHC substances (i.e. REACH article 57 (1907/2006)).

¹³ A thermal runaway in a Li-ion battery is an uncontrolled rise in temperature, whereby heat caused by such factors as an internal short circuit, overheating or damage increases exponentially and may eventually lead to a fire or an explosion.

¹⁴ <https://rvs.rivm.nl/onderwerpen/zeer-zorgwekkende-stoffen>

soil may need to be remediated under the law. In addition, large quantities of lithium are released during fires involving Li-ion battery packs. Some of the lithium released in this way may form lithium hydroxide (LiOH), which may contribute to increased pH levels in firefighting water and the soil. Based on the measured lithium concentrations in the firefighting water used by the UHP extinguishing system (maximum of 286 mg/l), it cannot be ruled out that the use of such a system may cause increased hydroxide concentrations in the soil. By the same token, this may also cause the surface to develop corrosive properties. Furthermore, deploying a UHP extinguishing system on a hard surface in a residential area will cause the release of battery particles onto that surface, so that people – like children playing in the street – may be exposed to cobalt and nickel compounds and corrosive particles. Preventing exposure to these substances is also a key point of attention for the firefighters operating the UHP extinguishing system.

If the aforementioned quantities of metals are released through a rainwater sewer into a small body of water or watercourse with a small flow rate, the indicative environmental risk limit values for lithium may be exceeded. In very small bodies of water, the pH value may exceed the recommended level as well. The acute effects of an increased pH value and higher lithium concentration are likely to be temporary and remain limited as long as no more than around 240 g lithium is emitted through the firefighting water into a body of water with a volume greater than 1,000 m³. However, if cobalt and nickel compounds end up in surface water alongside lithium, this may cause environmental damage and a long-term negative impact on the ecosystem.

The two experiments yielded an indicative order of magnitude of the emission of heavy metals during EV fires. Emissions to firefighting water during the deployment of a UHP extinguishing system turned out to depend on a wide variety of factors, including the charge percentage, the battery pack type, the battery pack capacity, the course of the fire and the specific deployment of the UHP extinguishing system. Not all these factors could be taken into account in the two experiments. Despite these variables and emission variations, there were indications that deploying a UHP extinguishing system may cause a substantially greater environmental impact than allowing the vehicle to burn out under controlled conditions. Compared to the deployment of a submersion container, the emission levels during the deployment of a UHP extinguishing system proved to be less manageable. Moreover, deploying a submersion container is likely to cause the release of fewer poorly soluble cathode materials, which contain potentially harmful heavy metals.

Compared to an EV fire, a fire in a vehicle powered by a traditional combustion engine may also cause the release of substantial quantities of harmful hydrocarbons. Although hydrocarbons are less durable in practice than heavy metals, a fire in a traditional vehicle may also lead to a mandatory soil remediation under the law.

The quantities of hazardous substances released into the surrounding area when deploying a UHP extinguishing system may vary widely, dependent on the circumstances of the fire. Given that this extinguishing

method may lead to pollution of the surrounding area, it is advisable to collect as much of the firefighting water as possible when deploying a UHP extinguishing system in order to prevent the spread of contaminants. An extinguishing method whereby the firefighting water of the UHP extinguishing system is collected may prove to be effective and cause the least pollution compared to other extinguishing methods. Consequently, RIVM recommends conducting an investigation into methods to collect the firefighting water of UHP extinguishing systems specifically.

In situations whereby the firefighting water of the UHP extinguishing system is not collected, soil and water discharge system remediation may be necessary in the aftermath of the incident in order to reduce the environmental and health risks to acceptable levels. For this reason, RIVM recommends considering the environmental impact when deciding which extinguishing method to use.

1 Leeswijzer

Dit rapport presenteert de resultaten van metingen die zijn uitgevoerd in het kader van een brandexperiment, opgezet door een andere organisatie dan het RIVM: het NIPV in samenwerking met partnerorganisaties. Tijdens het experiment zijn diverse metingen uitgevoerd in verschillende matrices, zoals lucht, depositie en bluswater. De mogelijke effecten en receptoren die blootgesteld kunnen worden (bijvoorbeeld personen, het watermilieu of de bodem) variëren afhankelijk van de gemeten matrix. De resultaten en impact uit de verschillende matrices kunnen bovendien onderling gerelateerd zijn. Omdat de samenhang tussen de meetresultaten varieert en er verschillen zijn in monsternamen en analysemethoden, wijkt de structuur van dit rapport af van de gangbare opzet. Het rapport is als volgt opgebouwd:

De hoofdstukken [2] (aanleiding) en [3] (doelstelling) volgen de standaard structuur van een rapport.

In hoofdstuk [4] (methode) is de opzet van het experiment en de meet- en monsternamen methode op hoofdlijnen beschreven. Details over monsternamen en analysemethode zijn beschreven in [Bijlage 6]. Uitgebreide informatie over de opzet van het experiment is ook te vinden in het NIPV rapport van deze experimenten (zie Hessels en Brans Brandexperiment over de inzet van ultrahogedruk snij- en blussystemen bij branden in batterijen van elektrische voertuigen, NIPV 2024 [1]).

In hoofdstuk [5] (meetresultaten & analyse rook) worden rookmetingen beschreven, onderverdeeld in gassen en rookstofmonsters. Omdat er veel variabelen zijn die de meetwaarden voor een brand in de praktijk kunnen beïnvloeden, is gekozen de meetresultaten van gassen op hoofdlijnen te vergelijken met interventiewaarden¹⁵. Omdat het voor het begrip van de conclusies zinvol is te kunnen vergelijken met grafieken van de meetwaarden, is gekozen dit in dezelfde paragraaf [5.2] te beschrijven.

In hoofdstuk [6] (meetresultaten depositie) zijn meetresultaten van depositiemetingen verwerkt en [7] (meetresultaten bluswater) meetresultaten van het bluswater. De inhoud van deze hoofdstukken past meer bij een standaard structuur.

In hoofdstuk [8] (analyse en discussie rookstof en depositie) is een analyse uitgevoerd waarbij onder andere samenhang tussen de rookstofconcentraties [5.3] en depositie [6] onderwerpen ter discussie zijn.

In hoofdstuk [9] (Analyse en discussie bluswater) worden meetwaarden van bluswater geduid in vergelijking met andere onderzoeken en wordt een indicatie gegeven van de impact op water en bodem.

¹⁵ <https://rvs.rivm.nl/onderwerpen/normen/rampen-en-incidenten/interventiewaarden>

Hoofdstuk [10] (conclusie) beschrijft de conclusies, onderverdeeld in de verschillende matrices waarin gemeten is.

Voor een beter begrip van dit rapport is het wenselijk om over enige basiskennis van li-ion-batterijen te beschikken. In [Bijlage 5] is achtergrondinformatie over li-ion-batterijen beschreven die in dit rapport naar voren komen.

Alle kruisverwijzingen in dit rapport zijn tussen [] geplaatst. Dit geldt voor tabellen, figuren, bijlagen, literatuurlijst, paragrafen en hoofdstukken.

2 Aanleiding

De energietransitie en de daarmee samenhangende elektrificatie van de automobiellindustrie ontwikkelen zich in hoog tempo. Hierdoor neemt het aandeel van elektrisch aangedreven voertuigen aanzienlijk toe in vergelijking met voertuigen die zijn uitgerust met een traditionele brandstofmotor. Met de groei van het aantal elektrische voertuigen stijgt ook het aantal branden waarbij deze voertuigen betrokken zijn.

Het blussen van branden in elektrische voertuigen brengt specifieke uitdagingen met zich mee, met name wanneer het batterijpakket betrokken raakt bij de brand. Dit komt onder andere doordat bluswater de brandende batterij vaak niet goed kan bereiken. Een belangrijke oorzaak hiervan is dat de batterij zich in een waterdichte behuizing bevindt die meestal onder het voertuig is geplaatst.

In de praktijk zijn standaard blusmethoden¹⁶ over het algemeen effectief in het doven van de vlammen in de cabine van elektrische voertuigen. In sommige gevallen kunnen deze methoden ook in zekere mate de brand in het batterijpakket onder controle brengen. Echter, zelfs wanneer de brand in het batterijpakket lijkt te zijn gedoofd, blijkt deze na verloop van tijd vaak toch weer te kunnen opvlammen. Dit verschijnsel maakt het bestrijden van dergelijke branden aanzienlijk complexer en vraagt om aangepaste blus technieken en strategieën.

Tot 2024 gebruikte de brandweer voornamelijk twee oplossingsrichtingen voor het definitief blussen van branden in elektrische voertuigen. Eén methode is om het voertuig gecontroleerd te laten uitbranden en uitbreiding van de brand te voorkomen. De andere oplossing is om het voertuig in een dompelcontainer te plaatsen. Dit is een soort waterdichte bak die vervolgens met voldoende water wordt gevuld, zodat tenminste de batterij van het voertuig volledig ondergedompeld is. Bij deze methode is het soms nodig om het voertuig langdurig (dagen) onder water te houden totdat de batterij gestabiliseerd is en niet meer kan ontbranden.

Beide methoden hebben nadelen, waardoor het wenselijk was om naar alternatieven te zoeken. Hierbij is gekeken of een ultra hoge druk snij- en blussysteem (UHD) een passende oplossing kon bieden voor dit vraagstuk. Om een veilige UHD-blusmethode te ontwikkelen en te testen heeft het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV) op 27 juni 2024 in samenwerking met een aantal partners twee brandproeven met elektrische voertuigen uitgevoerd op het brandweer oefenterrein van Brandweer Schiphol. Het RIVM is bij deze proeven als gast uitgenodigd om metingen te verrichten.

¹⁶ Met een standaard blusmethode wordt in dit rapport een blussing met lage druk, middendruk of hogedruk blusstralen met water bedoeld. De belangrijkste eigenschap binnen deze context is dat met standaard blusmethoden bluswater de brandende batterij niet altijd goed kan bereiken omdat deze zich in een waterdichte batterijbehuizing bevindt. De pompdruk bij standaard blusmethoden varieert bij de verschillende standaard methoden en bevindt zich in het bereik van ongeveer 6 tot 50 bar. Op de straalpijp is de druk door drukverlies in de slangen vaak lager.

De partners met wie het NIPV deze test heeft uitgevoerd zijn: de Duitse werkgroep VDA/VDIK, Brandweer Amsterdam Airport Schiphol, de veiligheidsregio's Haaglanden en Utrecht, brandweer Amsterdam-Amstelland, Coldcut Systems, TATA steel en Gezamenlijke Brandweer.

Voor het RIVM boden deze brandproeven een waardevolle gelegenheid om meer informatie te verzamelen over een aantal belangrijke vraagstukken met betrekking tot branden van elektrische voertuigen met li-ion-batterijen:

1. Risico's van rookgassen voor de omgeving
Verschillende studies hebben de risico's van rook van li-ion-batterijen onderzocht, waarbij vooral het vrijkomen van fluorwaterstofgas veel aandacht heeft gekregen zoals o.a. RIVM 2021-0019 [8] en Larsson et al. 2017 [2]. Het idee dat bij li-ion-batterij branden veel gevaarlijke gassen waaronder fluorwaterstof vrijkomen, kan de indruk wekken dat de fluorwaterstof component in rookgassen van een elektrische autobrand een groter risico vormen voor de omgeving dan de rookgassen van traditionele voertuigen met brandstofmotor. Deze test biedt een goede gelegenheid om bij de gegeven brand- en weersomstandigheden te meten wat realistische rookgasconcentraties zijn in een benedenwinds gebied bij een elektrische autobrand.
2. Effecten van depositie
Het is bekend dat bij een li-ion-batterij brand veel kleine deeltjes vrijkomen die zich als depositie in de omgeving kunnen afzetten. Deze depositie heeft doorgaans een basisch karakter en kan schadelijke metaalverbindingen bevatten zoals kobalt en nikkel. Deze test biedt de mogelijkheid om meer inzicht te krijgen in de verspreiding van depositie en hoeveelheden in het benedenwinds gebied van de brand.
3. Effecten van inzet UHD-systeem op bluswater
Hoewel er meer studies zijn uitgevoerd naar het bluswater van li-ion-batterij branden, hebben de auteurs van dit rapport geen onderzoek gevonden dat de impact van het gebruik van een ultra hoge druk systeem (UHD) op de vervuiling van bluswater in kaart brengt. Hoewel de testopstelling niet is ontworpen om deze vraag nauwkeurig te beantwoorden, kan deze test wel een indicatie geven van de gevolgen van de inzet van UHD-systemen op de mate van vervuiling van het bluswater.

De gewenste informatie is door het RIVM bij deze experimenten verzameld door benedenwinds van de brand luchtmetingen uit te voeren en monsters te nemen van zowel rookstof, bluswater als depositie van rookstofdeeltjes direct benedenwinds van de brand.

Dit rapport beschrijft de resultaten van de metingen die door het RIVM zijn uitgevoerd. De uitkomsten van het NIPV onderzoek zijn beschreven door T. Hessels en H. Brans in het NIPV rapport 'Brandexperiment over de inzet van ultrahogedruk snij- en blussystemen bij branden in batterijen van elektrische voertuigen 2024' [1].

3 Doelstelling

Voorafgaand aan het onderzoek zijn de volgende onderzoeksvragen opgesteld:

1. Welke rookgasconcentraties worden direct benedenwinds (op een afstand van 7-10 meter vanaf de brand) waargenomen op ademhoogte?
 - a. Welke gasen worden in verhoogde concentraties waargenomen?
 - b. Welke veranderingen zijn waarneembaar in de rookgassamenstelling tijdens de brand?
 - c. Welke interventiewaarden voor toxische en irriterende gasen worden in welke mate overschreden en hoe lang duurt deze overschrijding?
2. Welke rookstofconcentraties worden benedenwinds waargenomen?
 - a. Wat is de samenstelling van het rookstof en hoe verhouden rookstofconcentraties zich tot gasconcentraties?
3. Welke depositiehoeveelheden worden er benedenwinds waargenomen?
 - a. Welke metalen en anionen worden in welke hoeveelheden in depositie aangetroffen?
 - b. Hoe is de verdeling van de depositie in het benedenwinds gebied in relatie tot de windrichting?
4. Welke stoffen worden in welke concentraties aangetroffen in het bluswater?
 - a. Welke concentraties metalen en anionen worden aangetroffen in het bluswater?
 - b. Wat is de impact van de inzet van een UHD-systeem op de gemeten concentraties metalen en anionen in het bluswater?

Na het analyseren van de meetresultaten bleek dat de impact van het UHD-systeem op de emissies van schadelijke stoffen in het bluswater aanzienlijk was. Daarom is geprobeerd om met de beperkte beschikbare informatie een zo goed mogelijk beeld te geven van de impact van het gebruik van het UHD-systeem. Hiervoor zijn de volgende aanvullende onderzoeksvragen gesteld:

5. Wat is de geschatte totale emissie van schadelijke metalen na gebruik van de blusmethode met een UHD-systeem?
 - a. Wat kan de toename van schadelijke stoffen in het bluswater na UHD-inzet verklaren?
6. Welke schadelijke milieueffecten kunnen optreden na inzet van een UHD-blussing van een elektrische auto?
 - a. Hoe verhoudt de totale emissie zich tot verschillende milieunormen?
 - b. Zijn er maatregelen nodig na afloop van een UHD-blussing?
 - c. Is er een blusmethode van branden met elektrische auto's die vanuit milieuperspectief een voorkeur heeft?

De antwoorden op onderzoeksvragen 1 tot en met 4 zijn binnen de context van de bemonsteringswijze en de experimentele opzet representatief voor gelijkwaardige elektrische autobranden. De

beantwoording van vragen 5 en 6 berust deels op enkele aannames en gaat gepaard met meer onzekerheid, waardoor de antwoorden op deze vragen een meer indicatief karakter hebben.

Over het algemeen geldt dat de meetresultaten sterk worden beïnvloed door veelal oncontroleerbare omstandigheden, zoals windsnelheid, wat de volledige reproduceerbaarheid van de resultaten in de praktijk vrijwel onmogelijk maakt. Tegelijkertijd biedt deze experimentele opzet een kans om vanuit een realistisch perspectief kennis te vergaren over de verspreiding van gevaarlijke stoffen bij een echte brand in een elektrisch voertuig.

4 Methode

4.1 Opzet en uitvoering experiment

In deze paragraaf wordt de opzet van het brandexperiment op hoofdlijnen toegelicht. Er zijn op 27 juni 2024 twee identieke experimenten uitgevoerd waarbij een elektrisch voertuig in de brand is gestoken: experiment 1 en experiment 2. Het brandverloop is niet geheel identiek verlopen. In deze rapportage worden enkel de waarnemingen vermeld die relevant zijn voor het onderzoek van het RIVM. Een uitgebreide beschrijving van de opzet en resultaten van het brandexperiment is beschreven in Hessels & Brans, 2024 [1].

De batterijen van de elektrische voertuigen zijn voor dit brandexperiment volledig opgeladen. Beide voertuigen beschikken over een li-ion NMC622¹⁷ batterij met een capaciteit van 75 kWh. Een thermal runaway werd gestart door het batterijpakket van boven te doorboren met een lange boor. De brand werd in eerste instantie niet beïnvloed, waarna een standaard blussing werd uitgevoerd op de cabine van het voertuig (ongeveer 12-13 minuten na het ontstaan van de brand). Deze standaard blussing kon de brand in de batterij niet blussen, waardoor de brand in het batterijpakket bleef doorontwikkelen. De brand in de batterij werd bij experiment 2 ongeveer 31 minuten na ontbranding met behulp van een UHD-blussysteem geblust. Bij experiment 1 was dit ongeveer 28 minuten.

Achtergrondinformatie over UHD-snij- en blussysteem

Een UHD-systeem is een blus- en snijsysteem dat onder zeer hoge druk (orde grootte 300 bar) door de carrosserie en de batterijbehuizing kan snijden. Tijdens het snijden worden kleine harde deeltjes (abrasieve deeltjes/grit) toegevoegd. Het UHD-systeem wordt vanaf de bovenzijde ingezet. Wanneer de gewenste diepte is bereikt, stopt het toedienen van het abrasief. Vervolgens kan met alleen water verder worden geblust door het gecreëerde gat. Wanneer te diep wordt gesneden, ontstaat een gat aan de onderzijde van de batterijbehuizing waardoor het bluswater weg kan lopen. Om de blussing effectief te houden moet dan doorlopend water worden toegevoegd om het waterpeil op niveau te houden zodat koeling en blussing doorgaat.

Een batterijpakket van een elektrische auto bevindt zich in een stevige waterdichte behuizing en is daarom lastig te blussen met traditionele blusmiddelen. De batterijbehuizing wordt ter beeldvorming soms omschreven als een platte badkuip met een deksel. Met een combinatie van een UHD-systeem en een warmtebeeldcamera kan een zogenaamde hotspot (brandhaard) gelokaliseerd en effectief worden geblust. Voordat het UHD-systeem kan worden ingezet, moet onder andere eerst de carrosserie brand grotendeels worden geblust. Dat gebeurt in dit experiment met standaard blusmiddelen. Alleen de laatste brandhaard in het batterijpakket wordt met een UHD-systeem geblust.

¹⁷ Er zijn verschillende typen Li-ion-batterijen (zie Bijlage 5). Een NMC Li-ion-batterij heeft een kathode met daarin nikkelmangaan-cobaltoxide (NiMnCoO₂) verwerkt. Het getal 622 geeft informatie over de verhouding van metalen in de kathode. Een NMC622 heeft een molverhouding van Lithium:10, Nikkel:6 Mangaan:2 en Kobalt:2.

De batterijen bevonden zich in een batterijbehuizing bestaand uit één compartiment, waardoor de branduitbreiding binnen de gehele batterij min of meer ongehinderd kon plaatsvinden. Na afloop van de experimenten zijn de batterijen gedemonteerd en onderzocht. Hieruit kwam naar voren dat de batterij van voertuig 1 (experiment 1) voor ongeveer de helft bij de brand betrokken is geweest en de batterij van voertuig 2 (experiment 2) zo goed als volledig bij de brand betrokken is geraakt. Door de inzet van het UHD-systeem is de branduitbreiding in de batterij van experiment 1 eerder gestopt dan bij experiment 2. Zie Hessels & Brans, 2024 [1].

De testvoertuigen stonden op een plaat met een kleine hellingshoek. Bluswater werd opgevangen met een plastic zeil en vervolgens afgepompt naar een vuilwatertank. Hoewel het zeil direct onder de auto tegen hitte beschermd was met stalen platen bleek het nodig het zeil te koelen met water, zie [Figuur 1]. Deze methode beïnvloedt de meetwaarden op een aantal manieren:

- Het koelwater verdunt de gemeten concentraties in het bluswater.
- De relatieve luchtvochtigheid neemt toe tijdens deze koelactiviteiten.
- Deeltjes en wateroplosbare gassen kunnen worden uitgewassen door het koelwater. Gezien de wijze van koelen (op de bodem) is de verwachting dat dit geen significante invloed heeft gehad op de meetwaarden van rook en depositie.

Figuur 1 Het moment dat het voertuig van experiment 1 volledig in brand raakt. De brandweer koelt op dit moment alleen het zeil, er wordt nog niet actief geblust. Achter de auto is de waterkering als een blauwe wand zichtbaar. Achter deze wand stond de meet- en monstername apparatuur. De rook stijgt bij dit experiment grotendeels hoger dan de meetopstelling. Mede hierdoor zijn bij dit experiment lage concentraties van gassen en deeltjes in de lucht gemeten.

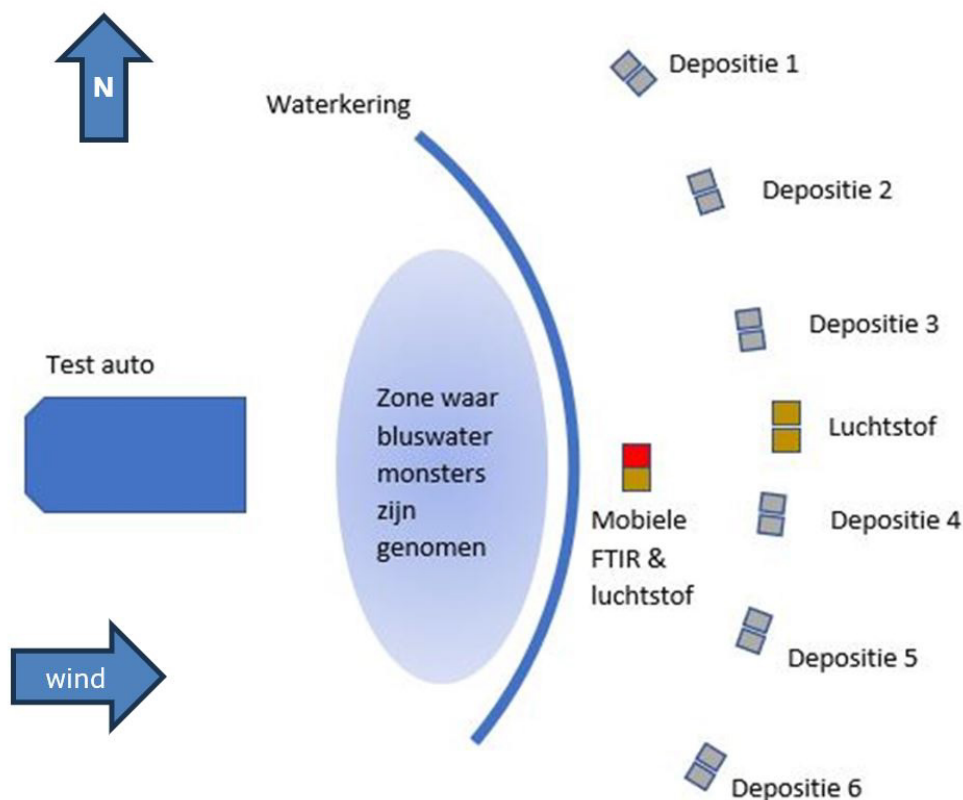


4.2 Meet-en monsternamemethode

Op een afstand van 7 tot 10 m benedenwinds van het voertuig zijn diverse meet- en monsternamapunten geplaatst. De meet- en monsternamapunten zijn weergegeven in [Figuur 2] en bestonden op hoofdlijnen uit de volgende onderdelen:

- Mobiele gas-FTIR en luchtstofbemonsteringsapparaat op +/- 7 m van de brand met monsternamahoogte op +/- 1,5 m. Doordat deze meet-en monsternamaset mobiel was, kon deze verplaatst worden wanneer de wind draaide. Hierdoor kon met deze apparatuur gedurende het experiment continu benedenwinds van de brand gemeten en bemonsterd worden. De gas-FTIR analyseerde gassen, het luchtstofbemonsteringsapparaat verzamelde rookstofdeeltjes.
- Dubbel luchtstofbemonsteringsapparaat op vaste positie op +/- 10 m van de brand met een monsternamahoogte van +/- 0,5 m.
- Dubbele depositiebakken stonden op de bodem rondom de kering op ongeveer 10 m van de brand. Deze bakken verzamelden depositie van de brand.

Figuur 2 Een schematisch overzicht van verschillende meet- en monsternamelocaties. Alle monsterlocaties bevonden zich ten oosten van de brand. De windrichting is indicatief aangegeven en varieerde licht. De mobiele FTIR en het luchtstofbemonsteringsapparaat kon bij verandering van windrichting verplaatst worden zodat deze vrijwel continu volledig benedenwinds kon staan. Depositie locatie 6 is alleen bij experiment 2 geplaatst.



Gasmetingen zijn met een Bruker Matrix MG2 FTIR uitgevoerd. Alle hierboven genoemde luchtstofbemonsteringsapparaten zijn ingesteld

met een pompdebiet van 5 Nm³/u en voorzien van Total Suspended Particulate (TSP) filters. De depositiebakken zijn per locatie dubbel geplaatst en hebben een bemonsterd oppervlak van 35,5 cm bij 25,5 cm. De depositiebakken zijn na monsternamen afgesloten met een deksel, meegenomen naar het RIVM, gedroogd en vervolgens geveegd met demi-water bevochtigde watjes. Monsternamen heeft per depositiebak plaatsgevonden, waarbij per monsterlocatie een depositiebak is geanalyseerd op elementen en de andere depositiebak op anionen. Het luchtfilter van mobiele luchtstof is op elementen geanalyseerd. Van de dubbele uitgevoerde vaste (stationaire) luchtstofbemonstering locatie is één filter op elementen en de andere filter op anionen geanalyseerd. Elementen analyses zijn uitgevoerd met ICPMS en anionen analyses met ionchromatografie. Meer details over monster- en analysemethode zijn weergegeven in Bijlage 6.

Tijdens het experiment is actief geblust waarbij soms water over de meetopstelling is gekomen. Effectieve blussing leidt eveneens tot een sterke verhoging van de luchtvochtigheid, waardoor het dauwpunt snel bereikt wordt en waterdruppels (stoom/aerosol) met de rook meegevoerd worden. Waterdruppels en hoge luchtvochtigheid beïnvloeden meetresultaten van alle meetopstellingen. Zo geeft H₂O (in de gasfase¹⁸) storende interferenties in het infrarood spectrum van relevante verbrandingsgassen (NO en vooral NO₂); zorgen grote hoeveelheden waterdamp voor verstoppingen van luchtfilters; en worden neergeslagen depositiedeeltjes door spattend bluswater uit de depositiemonsterbakken gespetterd.

Het nemen van bluswatermonsters kon vanwege veiligheidsrestricties beperkt worden uitgevoerd. Gedurende het verloop van experiment 1 zijn onvoldoende bluswatermonsters genomen om een trend af te leiden. Tijdens experiment 2 zijn in de gemarkeerde zone vijf bluswatermonsters genomen na de normale blussing, maar voor de inzet van het UHD-systeem. Na inzet van het UHD-systeem zijn nog twee bluswatermonsters genomen. Hierbij is een locatie gekozen waar alleen na de UHD-blussing veel zwart sediment zichtbaar was. Bluswatermonsters zijn met ICPMS op elementen geanalyseerd en met ionchromatografie op anionen.

4.3 Meteo en omgevingsomstandigheden

Weersomstandigheden en warmte beïnvloeden rookverspreiding en depositie bij branden in open lucht, zie ook RIVM 2024-0034 [9]. Bij gelijke warmte-inhoud van de rook zal bij lage windsnelheden de rook geneigd zijn op te stijgen, terwijl bij hogere windsnelheden de rookpluim meer naar het maaiveld wordt gedrukt. Bij een lagere warmte-inhoud heeft de rook een minder grote opwaartse kracht dan bij warme rook. Om deze reden stijgt rook in de doof-fase van de brand vaak minder vergeleken met een volledig ontwikkelde (uitslaande) brand. Deze verschijnselen zijn ook bij deze brand zichtbaar, zowel bij de meetgegevens als visueel. Zie voor visuele weergave [Figuur 3] bij de beschrijving van het brandverloop.

¹⁸ De gebruikte gas-FTIR verwarmt gassen tot 180 °C, waardoor alle weergegeven meetwaarden zich in de gasfase bevinden. Daarom wordt binnen deze context gesproken over H₂O in de gasfase en niet over waterdamp.

Het terrein in de directe omgeving van de testlocatie bestaat grotendeels uit graslanden zonder gebouwen, afgezien van een rij struiken op ongeveer 20 m van de brand. Het terrein heeft de rookverspreiding en depositie niet noemenswaardig beïnvloed. Tijdens de test was het onbewolkt (geen neerslag). De relatieve luchtvochtigheid varieert tijdens de test tussen de 49 en 51%. Overige relevante weersomstandigheden tijdens de test zijn in onderstaand overzicht weergegeven.

Tabel 1 Meteo gegevens tijdens de test bij weerstation Schiphol (bron: KNMI). De eerste twee tijdvakken geven de situatie tijdens de eerste test weer, de laatste twee tijdvakken tonen de situatie tijdens de tweede test.

Tijdvak (uur)	Windrichting (graden)	Uurgemiddelde snelheid (m/s)	Hoogste windstoot (m/s)	Temperatuur °C
10-11	250	7	11	27,0
11-12	250	7	10	26,5
14-15	280	5	10	26,6
15-16	250	7	10	25,4

De in de tabel weergegeven windsnelheid komt redelijk overeen met de jaargemiddelde windsnelheid voor kustgebieden in Nederland. In andere delen van Nederland ligt de gemiddelde windsnelheid doorgaans tussen de 4 en 5 m/s.

Doordat de tijdens de experimenten heersende windsnelheid enigszins boven het gemiddelde ligt voor grote delen van Nederland, kan de gemeten rookgasconcentratie hoger uitvallen dan verwacht zou worden bij lagere windsnelheden.

4.4 Operationele beperkingen

De metingen en monsternamen zijn zo goed en zo frequent mogelijk uitgevoerd binnen de praktische beperkingen van het experiment. Onderzoek naar de effectiviteit van een UHD-blussysteem en methodiekontwikkeling voor werken met UHD-blussystemen waren het primaire doel van de test. Hierdoor heeft het RIVM een aantal concessies moeten doen ten behoeve van uitvoering van het primaire onderzoeksdoel en de veiligheid tijdens het experiment.

Omdat er bij deze test ook diverse risicovolle situaties konden ontstaan golden veiligheidsrestricties die in sommige situaties de mogelijkheden voor het nemen van monsters hebben beperkt. Zo is het bijvoorbeeld niet mogelijk geweest tijdens de inzet van het UHD-systeem bluswatermonsters te nemen. De mobiele gas-FTIR en luchtstofbemonstering kon bij experiment 1 niet goed benedenwinds worden gepositioneerd, terwijl dit bij experiment 2 wel mogelijk was. Beeldmateriaal van de experimenten en ook meetresultaten geven de indruk dat bij experiment 1 de mobiele gas-FTIR tijdens een groot deel van de brand niet volledig benedenwinds heeft gestaan. Zoals in de voorgaande paragraaf is besproken, worden de meetresultaten van een experiment in de buitenlucht in sterke mate beïnvloed door veelal oncontroleerbare omstandigheden, zoals de windsnelheid. Dit beperkt de reproduceerbaarheid van de resultaten. De

uitkomsten van dit onderzoek bieden wel een realistisch beeld van de verspreiding van gevaarlijke stoffen bij een brand in een elektrisch voertuig. Dit heeft betrekking op alle meetwaarden en de daarvan afgeleide conclusies die worden getrokken voor vergelijkbare situaties.

4.5 Brandverloop en rookverspreiding

4.5.1 Algemeen

Het brandverloop en de rookverspreiding worden over het algemeen beschouwd als testresultaten. In dit rapport worden deze resultaten gezien als onderdeel van het NIPV-onderzoek, zoals beschreven door Hessels & Brans, 2024 [1]. Mechanismen zoals brandverloop en rookverspreiding worden in dit rapport behandeld als de gegeven omstandigheden waaronder de metingen hebben plaatsgevonden. Om deze reden is ervoor gekozen om het brandverloop en de rookverspreiding op te nemen in de methodebeschrijving.

4.5.2 *Verskil in brandverloop en monstername experiment 1 en 2*

Bij experiment 1 lijkt, op basis van indrukken door visuele waarneming, minder rook te zijn vrijgekomen dan bij experiment 2. Het voertuig van experiment 1 was in de laadruimte/ passagiersdeel ook vrij van interieur-bekleding en autostoelen. Bij het voertuig van experiment 2 waren deze wel aanwezig. De rook die vrijkwam verspreidde zich bij experiment 1 hoger, waardoor deze grotendeels hoog over de meetapparatuur is gewaaid, zie voor beeld pluimstijging [Figuur 1]. Tot slot bleek dat de mobiele meetapparatuur niet tijdens de gehele brand volledig benedenwinds was geplaatst. Door deze factoren is er grotendeels naast of onder de rookpluim gemeten.

Bij experiment 2 lijkt meer rook te zijn vrijgekomen die ook dicht bij de grond bleef. De omstandigheden waren bij dit experiment beter om de meetapparatuur geheel benedenwinds te houden. Hierdoor is bij experiment 2 de meet- en monsternameapparatuur meer aan rook en schadelijke stoffen blootgesteld, wat terug te zien is in de meetresultaten.

Naast verschil in rookgasmetingen zijn zoals eerder vermeld bij monstername van bluswater gedurende experiment 1 onvoldoende monsters genomen om een trend af te kunnen leiden.

Vanwege de grote verschillen in de kwaliteit van de monstername en meetresultaten, is experiment 1 slechts summier uitgewerkt in dit rapport. De focus van deze rapportage en de analyse van de meetresultaten ligt daarom op experiment 2. Dit geldt zowel voor de metingen van de rookgassen als die van het bluswater. Van experiment 1 zijn echter wel bruikbare resultaten beschikbaar met betrekking tot de depositie. Deze resultaten zijn volledig uitgewerkt in hoofdstuk 6 en in de bijlagen.

4.5.3 *Brandverloop experiment 2*

Meetresultaten worden sterk beïnvloed door de brandontwikkeling en blusactiviteiten. Een feitenrelaas van het verloop van de branden is helder beschreven in de bijlagen van Hessels & Brans, 2024 [1]. Omdat een aantal gebeurtenissen sterk van invloed is op de meetresultaten, is

een selectie uit dit feitenrelaas van experiment 2 hierna visueel weergegeven. N.B. voor de volledigheid is een gelijksoortig overzicht van experiment 1 ook weergegeven in [Bijlage 2].

Figuur 3 Selectie van beelden uit de tijdlijn van experiment 2 van [NIPV rapport Hessels & Brans 2024]: Start van de brand is om 14:10 uur. Net buiten beeld achter de waterkering staat de meetapparatuur van het RIVM.

14:14 uur: De brand ontwikkelt zich vanaf nu snel en de rook is duidelijk waarneembaar.



14:16 uur: De auto staat nu volledig in brand, alleen de voorkant niet.



14:23 uur: Aanvang blussing met twee waterstralen (lage druk).



14:23 uur + 10 s: Door blussing daalt de rooktemperatuur en stijgt de rook minder. Waterdamp is zichtbaar als witte rook. Vanaf dit moment worden hogere concentraties CO waargenomen.



14:37 uur: Vijf minuten voor inzet van het UHD-systeem. Er zijn vlammen uit de onderzijde van de auto zichtbaar. Rond deze periode zijn de gemeten fluorwaterstof concentraties in de lucht het hoogst.



5 Meetresultaten en analyse rook

5.1 Omstandigheden

De in dit hoofdstuk beschreven rookgas- en rookstofmetingen geven een indruk van realistische rookconcentraties in de buitenlucht van een brand met een elektrisch voertuig. De gemeten gasconcentraties vertonen sterke fluctuaties doordat bij een buitenbrand de kolkende rook afwisselend wel en niet over de bemonsteringssonde trekt. Bovendien verandert de samenstelling van de rook naarmate andere materialen dominant worden als brandstof of doordat het brandverloop wordt beïnvloed door factoren zoals wind of blusactiviteiten. Deze fluctuaties hebben invloed op alle metingen, maar zijn het meest prominent zichtbaar bij verschillende rookgasmetingen.

De keuze van de definitieve blusmethode (dompelcontainer of UHD-methode) heeft, afgezien van de duur van de metingen weinig invloed op de meetresultaten. Bij een scenario "gecontroleerd uitbranden" zijn vooral de meetresultaten voor de eerste blusactiviteiten (bij experiment 2 om 14:23 uur) representatief.

Figuur 4 Een illustratief voorbeeld van de rookverspreiding tijdens experiment 2 voor de eerste blussing (14:23 uur) toont hoe de rook bij vlagen, als het ware "puffend," vrijkwam. Hierdoor werd de meetapparatuur (locatie gemarkeerd met een rode pijl) afwisselend wel en niet aan de rook blootgesteld. De grijze vlakken in de afbeelding maskeren vliegtuigen, terwijl de gele tankwagen op de achtergrond het bluswater verzamelde.



5.2 Gassen

5.2.1 Inleiding

Tijdens de rookgasmetingen zijn zowel H_2O als CO_2 in verhoogde concentraties in de achtergrond aanwezig. De hoeveelheid waterdamp in de omgevingslucht wordt doorgaans uitgedrukt als percentage relatieve luchtvochtigheid. Relatieve luchtvochtigheid wordt (onder andere) bepaald door zowel de hoeveelheid waterdamp per volume-eenheid als de temperatuur. De gemeten waterdampconcentraties zijn echter weergegeven in absolute eenheden (vol%) in plaats van als relatieve luchtvochtigheid.

De achtergrondconcentratie van CO_2 is enigszins verhoogd en varieert licht (mogelijk mede als gevolg van verbrandingsgassen van taxiënde

vliegtuigen). Meetwaarden van CO₂ zijn verminderd met een achtergrondconcentratie van 546 ppm CO₂. Dit is de gemiddelde achtergrondconcentratie die met gas-FTIR is waargenomen.

Achtergrondinfo over metingen met gas-FTIR en correlatiefactor

Gasmetingen zijn uitgevoerd met een gas-FTIR (Fourier-Transform InfraRoodspectroscopie). Bij deze techniek wordt het infraroodspectrum van een gasmonster gemeten, waarmee zowel de aanwezigheid als de concentratie van specifieke gassen kan worden vastgesteld. Elk gas heeft een unieke "infrarood vingerafdruk", die bestaat uit een karakteristiek absorptiespectrum. Deze vingerafdrukken worden vergeleken met een bibliotheek van bekende spectra. De mate van overeenkomst tussen het gemeten spectrum en het referentiespectrum wordt weergegeven door een zogenaamde correlatiefactor. Een correlatiefactor van 1 duidt op een perfecte overeenkomst, terwijl een lagere correlatiefactor betekent dat de overeenkomst minder sterk is, wat kan wijzen op een minder betrouwbare identificatie of meting van het gas.

Bij de analyse van rookgassen wordt vaak gewerkt met complexe mengsels van vele verschillende gassen. In dergelijke omstandigheden kunnen meerdere gassen infraroodlicht absorberen op overlappende golflengten, wat leidt tot zogenaamde spectrale interferenties. Wanneer deze interferenties optreden, kan de herkenbaarheid van bepaalde gassen worden beïnvloed, vooral als hun concentraties relatief laag zijn of wanneer de absorptie wordt verstoord door de aanwezigheid van sterk absorberende interfererende stoffen. Hoewel moderne FTIR-software doorgaans rekening houdt met deze interferenties door gebruik te maken van wiskundige modellen en algoritmen, kan het in complexe situaties voorkomen dat aan een gas een lagere correlatiefactor wordt toegekend.

Een lagere correlatiefactor geeft aan dat de meting minder betrouwbaar is. Dit betekent dat er bij de interpretatie rekening moet worden gehouden met de mogelijkheid dat de gemeten absorptie (deels) afkomstig is van andere gassen in het mengsel. Dit kan ertoe leiden dat de concentratie van het betreffende gas wordt overschat in plaats van onderschat. Met name bij concentraties dicht bij de onderste detectiegrens ontstaat er een risico dat de software absorptie door interfererende stoffen foutief toewijst aan het gas dat wordt gemeten. Dit mechanisme leidt er in veel gevallen toe dat het weergegeven meetresultaat hoger kan zijn dan de werkelijke concentratie.

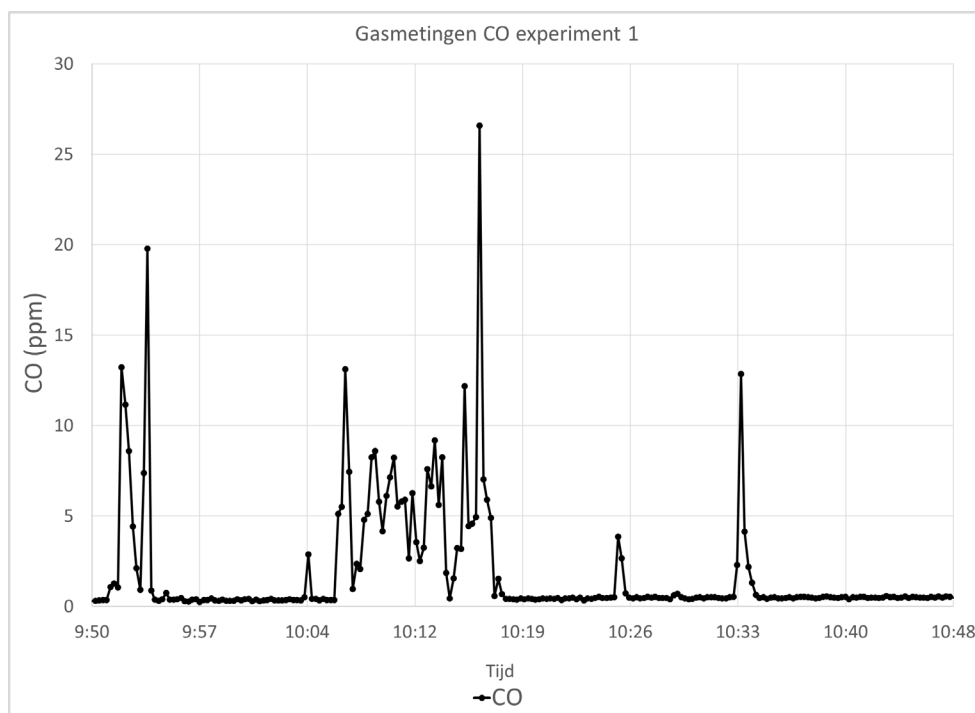
Sommige gassen zijn in lage concentraties gemeten binnen een complex gasmengsel met een hoge luchtvochtigheid. Hierdoor is de correlatiefactor van meetwaarden van sommige gassen relatief laag, vooral bij concentraties rond 5 ppm of lager. Om deze onzekerheid inzichtelijk te maken, is de correlatiefactor in het bijschrift van de meetresultaten vermeld voor elk gemeten gas. Voor CO, CO₂ en H₂O is de correlatiefactor voor vrijwel alle metingen gelijk aan 1. Aangezien de correlatiefactor afhankelijk is van de concentratie, is telkens de hoogste correlatiefactor vermeld die overeenkomt met de hoogst gemeten concentratie.

5.2.2 Gasmetingen experiment 1

Tijdens experiment 1 was er deels sprake van een te sterke pluimstijging. Hierdoor kwam de meetapparatuur onvoldoende in contact met de rook om representatieve gasconcentraties van de rookwolk te meten. Tijdens het blussen daalde de rookpluim, maar op dat moment stond de mobiele meetapparatuur niet volledig benedenwinds van de brand, waardoor de rookpluim zich langs de meetapparatuur verspreidde.

Hierdoor is bij experiment 1 alleen kortdurend maximaal 27 ppm CO waargenomen, andere gassen dan H₂O, CO₂ en CO bleven bij experiment 1 tijdens het gehele experiment onder de detectiegrens van ongeveer 1 ppm. De piek van 27 ppm CO werd gemeten op het moment dat de bluswerkzaamheden om 10:16 uur begonnen. Tijdens deze piek stijgt ook de H₂O concentratie kortdurend naar 3 vol% om vervolgens weer te dalen naar waarden onder de 2 vol%. Piekwaarden van CO₂ zijn op hetzelfde moment te meten en blijven onder 900 ppm.

Figuur 5 Verloop CO concentraties bij experiment 1. De piek bij 10:16 uur is gemeten tijdens de eerste blusactie. De meetpositie was niet volledig benedenwinds, waardoor deze meetwaarden niet volledig representatief zijn.



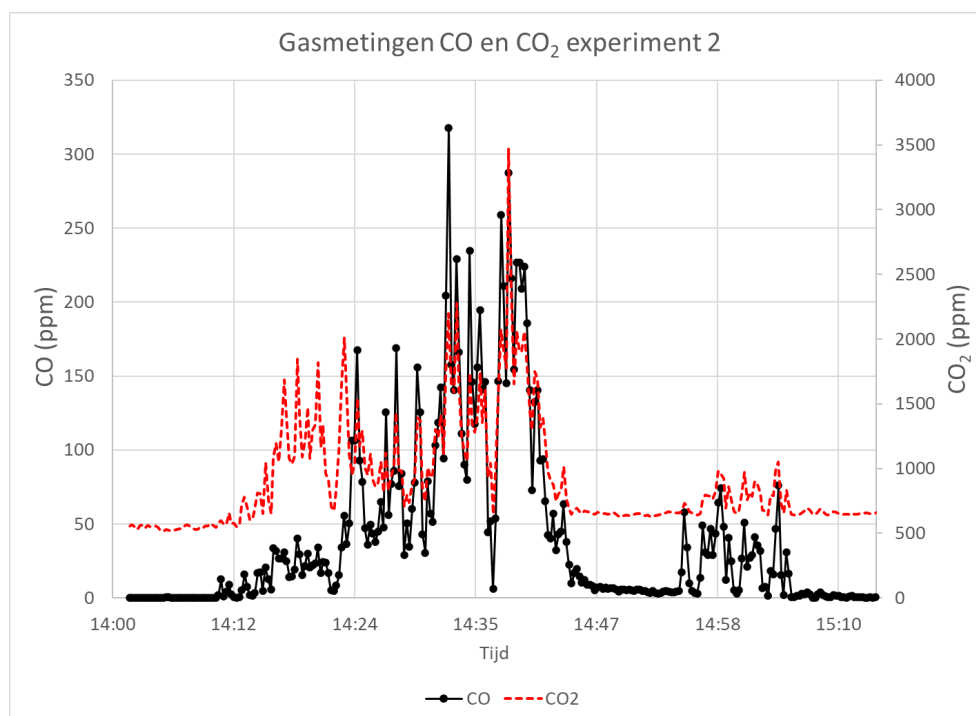
Doordat de rookgasmetingen bij experiment 1 niet op de juiste positie hebben plaatsgevonden, zijn deze meetresultaten niet representatief voor rookgasconcentraties volledig benedenwinds van de brand. De meetwaarden geven wel een duidelijk beeld dat direct naast de zichtbare rookwolk rookgas concentraties beduidend lager zijn. Bij dit experiment zijn de hoogste gasconcentraties gemeten tijdens de blussing rond 10:16 uur.

5.2.3

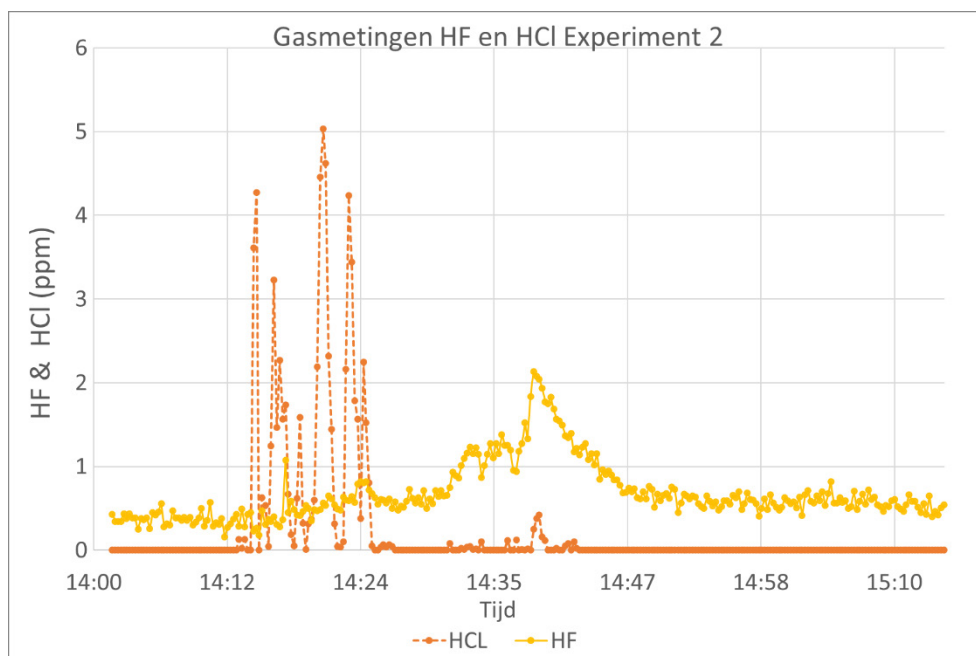
Gasmetingen experiment 2

In deze paragraaf zijn grafieken weergegeven met het verloop van verschillende gasconcentraties van experiment 2. Soms zijn de concentraties van gassen op verschillende Y-assen weergegeven. Het tijdstip 14:23 uur is de aanvang van de blussing. Bij veel gassen is op dat moment een grote verandering zichtbaar in gemeten concentraties.

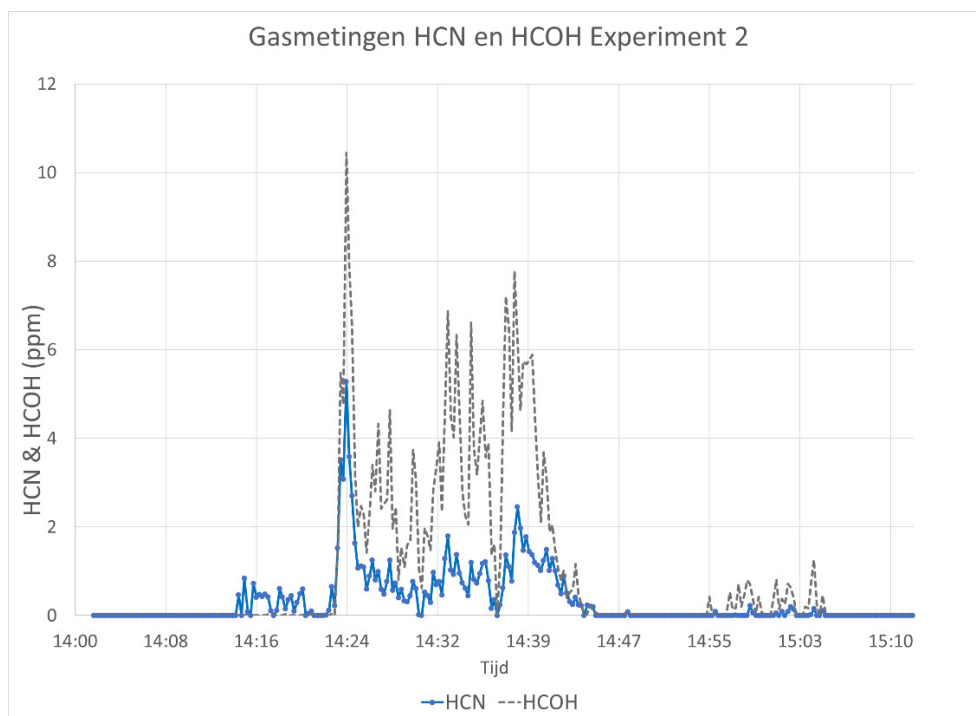
Figuur 6 Gasmetingen tijdens experiment 2 van CO (ppm linker as) en CO₂ (ppm rechter as). Correlatiefactor bij vrijwel alle meetpunten 1 voor beide gassen. De CO₂ concentratie is in deze afbeelding niet gecorrigeerd voor de achtergrond.



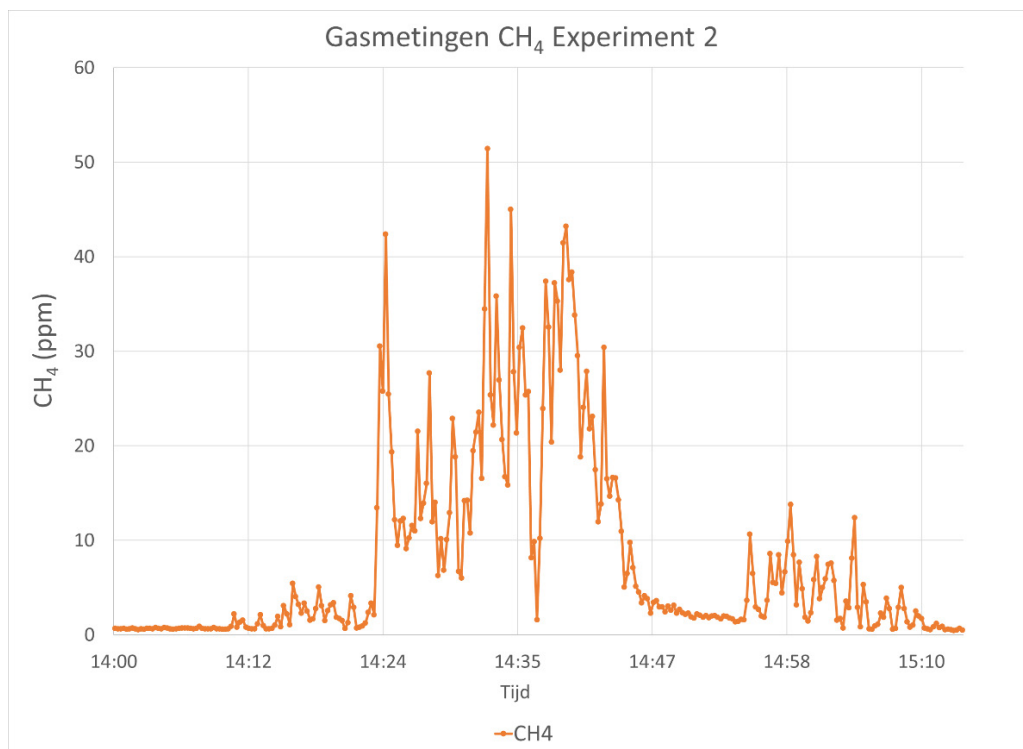
Figuur 7 Gasmetingen tijdens experiment 2 van HCl (chloorwaterstof) en HF (fluorwaterstof). Correlatiefactor bij hoogste gemeten concentratie: HCl max 0,5 en HF max 0,3.



Figuur 8 Gasmetingen tijdens experiment 2 van HCN (cyaanwaterstof) en HCOH (formaldehyde). Correlatiefactor bij hoogst gemeten concentratie: HCN max 0,3 en HCOH max 0,8.



Figuur 9 Gasmetingen experiment 2 van CH₄ (methaan). Correlatiefactor 1 bij concentraties boven 15 ppm.



5.2.4 *Algemene toelichting bij gemeten waarden experiment 2*

Verhoogde HCl concentraties zijn vooral gemeten aan het begin van de brand, tijdens het moment dat de cabine en de voorzijde van de auto brandt. Op dat moment zijn waarschijnlijk veel chloorhoudende kunststoffen (zoals PVC) bij de brand betrokken.

De gasmetingen laten voor diverse gassen een duidelijk verschil zien tussen de periode vóór en na het blussen van het voertuig om 14:23 uur met standaard blusmiddelen (dus zonder gebruik van het UHD-systeem). Verhoogde gasconcentraties HCl verdwijnen direct na het blussen, terwijl de gemeten concentraties van CO, HCN, HCOH en CH₄ vanaf dat moment juist aanzienlijk toenemen. De CO₂ concentraties veranderen beperkt (lichte toename) na het blussen. Bij dit mechanisme speelt onvolledige verbranding een belangrijke rol (zie volgende paragraaf). De oorzaak van de gemeten scherpe concentratiepiek rond 14:23 uur bij vrijwel alle gassen (behalve fluorwaterstof) komt waarschijnlijk doordat door de blussing de rook afkoelt. Hierdoor stijgt de rook minder op en wordt de meetapparatuur tijdelijk aan hogere rookgasconcentraties blootgesteld.

Het verloop van de fluorwaterstof (HF) concentratie lijkt in tegenstelling tot andere gassen weinig verband te hebben met de blusactiviteiten om 14:23 uur. Licht verhoogde HF concentraties (max 2 ppm) zijn kortdurend waarneembaar op het moment dat veel vlammen afkomstig uit het batterijpakket achter de bus zijn waargenomen (14:39 uur). Doordat de standaardblussing geen effect heeft op de brand in het batterijpakket, is ook geen significante invloed op de HF emissies

waarneembaar na de standaard blussing. Rond 14:43 uur wordt het UHD-systeem ingezet. [Figuur 7] toont dat de HF concentratie afneemt voor de inzet van het UHD-systeem.

Een belangrijk aandachtspunt is dat met name de relatieve lage correlatiefactoren voor HCN, HF en HCl wijzen op een verhoogde meetonzekerheid. Hierdoor kunnen de werkelijke concentraties lager zijn dan de weergegeven waarden. Het is echter niet mogelijk dat de werkelijke concentraties hoger zijn dan de gemeten waarden, aangezien hogere concentraties zouden resulteren in sterkere infrarood absorptie binnen de betreffende golflengtes, wat niet is waargenomen. Dit rapport hanteert de gemeten waarden zoals weergegeven in deze paragraaf als de aangenomen concentraties, ook bij meetresultaten waarbij de correlatiefactor relatief laag is

Ook is relevant te vermelden dat de gassen NO₂ en SO₂ niet zijn waargenomen in meetbare concentraties. Het gas NO is daarentegen wel gedetecteerd, maar met een lage correlatiefactor, terwijl het concentratieverloop van NO vrijwel gelijk verloopt met dat van H₂O. Dit suggereert dat de gemeten NO-waarden waarschijnlijk beïnvloed worden door interferentie van de extreem hoge concentraties H₂O. Bovendien lijkt de vorming van aanzienlijke hoeveelheden NO bij onvolledige verbranding, (lagere temperaturen en een beperkte zuurstofbeschikbaarheid), minder waarschijnlijk te zijn. Om deze redenen worden NO meetwaarden als onvoldoende betrouwbaar beschouwd en zijn ze niet opgenomen in de rapportage.

5.2.5 *Onvolledige verbranding en CO₂-CO ratio tijdens experiment 2*

Bij experiment 2 zijn over het algemeen relatief grote hoeveelheden H₂O, CO₂ en CO vrijkomen. Daarnaast doen blus- en koelwerkzaamheden de H₂O concentratie sterk toenemen. Dit is zichtbaar in de grafiek van [Figuur 10], waarin de H₂O concentraties en de verhouding tussen CO₂ en CO uiteen zijn gezet. Deze drie gassen¹⁹ zijn in de hoogste concentraties gemeten en geven informatie over het brandverloop.

Bij aanvang van de brand neemt de H₂O concentratie toe van +/- 1,7 vol% (≈ 50 % relatieve luchtvochtigheid) naar max. 2,5 vol% (≈ 73 % relatieve luchtvochtigheid), waarna een lichte daling volgt. De toename van H₂O komt tot dat moment voornamelijk van het koelwater dat de brandweer op het zeil spuit. Direct na aanvang van de blussing om 14:23 uur, stijgt de H₂O concentratie tot +/- 3,3 vol%. Dit is ver boven het dauwpunt (100 % relatieve luchtvochtigheid) wat betekent dat er condensatie plaatsvindt. Hierdoor is stoomvorming in de rook duidelijk waarneembaar, zie [Figuur 3]. Vanaf 14:25 uur daalt de H₂O concentratie tot dicht onder het dauwpunt. Na 14:45 uur daalt de H₂O concentratie verder terug richting achtergrondwaarden doordat er nog weinig water verdampt door blussing en doordat er geen koelwater meer wordt gebruikt.

¹⁹ De bemonsterde stoffen worden in de gas-FTIR verwarmd tot een temperatuur van 180 °C zodat alle stoffen zich tijdens de meting in de gasfase bevinden. Om deze reden wordt in dit rapport bij FTIR-metingen gesproken over gassen. Dit geldt ook voor water, dat bij kamertemperatuur technisch gezien beter zou worden aangeduid als "damp" in plaats van "gas".

Het blussend vermogen van water is onder andere toe te wijzen aan het sterke koelend vermogen (grotendeels door verdamping) en het verdringen van zuurstof door waterdamp. Zowel temperatuurverlaging als een verminderde beschikbaarheid van zuurstof dragen bij aan onvolledige verbranding van de materialen in het voertuig. Door onvolledige verbranding veranderen de rookgassen van samenstelling.

Gasmetingen uit de vorige paragraaf tonen dat de gemeten concentraties CO (koolmonoxide), HCN (cyaanwaterstof) HCOH (formaldehyde) en CH₄ (methaan) aanzienlijk toenemen in de fase na de eerste blussing (14:23 uur). Doordat de CO₂ concentraties tussen dezelfde perioden niet significant toenemen, wijst dit patroon op een verandering van (relatief) volledige naar meer (relatief) onvolledige verbranding. Als de CO₂ concentraties evenredig zouden toenemen met de concentraties van de andere gassen, zou de daling van de rookpluim, waardoor de meetapparatuur meer aan de rook wordt blootgesteld, een meer volledige verklaring zijn van de toename van deze gasconcentraties.

In onderstaande [Tabel 2] zijn de gemiddelde gasconcentraties van CO₂, CO, HCN, HCOH en CH₄ weergegeven in de periode voor de eerste blussing (14:15 – 14:23 uur) en na de eerste blussing (14:23-14:45 uur). Uit deze tabel blijkt dat de CO₂ concentraties tussen deze fasen met ongeveer 10 % toenemen. Daarentegen laten CO, HCN en CH₄ aanzienlijk sterkere toenames zien, met stijgingen van respectievelijk 350%, 220% en 530%. Voor de blussing zijn de gemiddelde gemeten waarden van HCOH vrijwel te verwaarlozen, maar na de blussing zijn de HCOH-concentraties meer dan drie keer hoger dan de concentraties van HCN.

Tabel 2 Gemiddelde gasconcentratie voor blussing (gemiddelde concentratie van periode 14:15-14:23 uur) en na blussing (gemiddelde concentratie van periode 14:23-14:45 uur) voor kooldioxide (CO₂), koolmonoxide (CO), cyaanwaterstof (HCN), formaldehyde (HCOH) en methaan (CH₄). De in deze tabel weergegeven CO₂ concentraties zijn verminderd met een achtergrond van 546 ppm.

	CO ₂ (ppm)	CO (ppm)	HCN (ppm)	HCOH (ppm)	CH ₄ (ppm)
voor blussing	630	23	0,30	0,05	3
na blussing	700	104	0,96	3,04	19

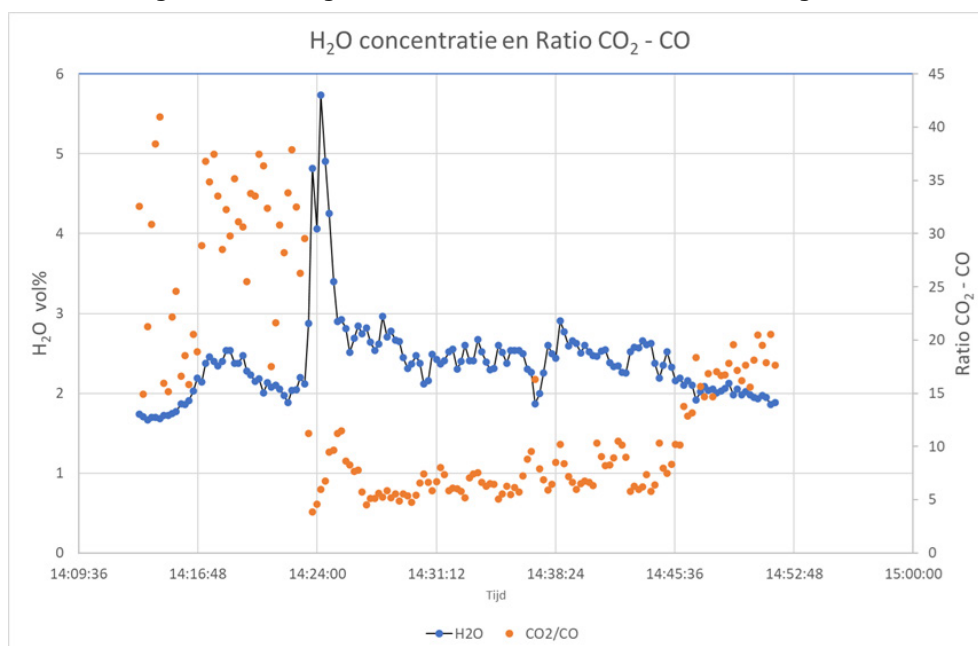
Verhoogde methaanemissies kunnen zowel het gevolg zijn van de gassen die vrijkomen bij een thermal runaway van batterijen [17] als van onvolledige verbranding [12]. Relatief hoge methaanconcentraties worden onder andere waargenomen op momenten waarop ook fluorwaterstof-concentraties meetbaar zijn. Dit suggereert dat er (ook) een verband bestaat met de brandontwikkeling in de batterij. Buiten de batterij kan methaan vrijkomen als bijproduct van de onvolledige verbranding van kunststoffen [12]. Bij volledige verbranding van kunststoffen komen normaalgesproken geen significante hoeveelheden methaan vrij. Kunststoffen bestaan uit polymeren die meestal koolstof en waterstof bevatten (zoals polyethyleen en polypropyleen), en bij volledige verbranding (optimaal zuurstofaanbod en hoge temperatuur)

worden deze componenten grotendeels omgezet in CO₂ en H₂O. Wanneer de verbranding echter onvolledig is (door een beperkt aanbod aan zuurstofaanbod en/of lagere temperatuur), kunnen er meer bijproducten ontstaan, waaronder methaan. Dat komt omdat de polymeren tijdens onvolledige verbranding niet volledig ontleden in de eenvoudigste verbrandingsproducten (CO₂ en H₂O), maar eerder in tussenproducten zoals CH₄, CO, HCOH en andere organische verbindingen (zoals vluchtige organische stoffen (VOS) en polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK) en fijnstof.

In de in [Tabel 2] weergegeven concentraties zijn CO₂ en CH₄ in deze hoeveelheden niet relevant voor veiligheid (brand / explosiegevaar) of gezondheid. De geringe toename van CO₂ en sterke toename van CH₄ (net als alle andere gassen in de tabel) zijn wel een indicator van onvolledige verbranding. De verhouding tussen CO₂ en CO is van de weergegeven stoffen wellicht de meest bekende indicator van de mate van onvolledige verbranding. In onderstaande [Figuur 10] is een CO₂/CO ratio op de rechter as weergegeven voor een indruk van onvolledige verbranding. Hoe lager de ratio, hoe hoger het aandeel CO in de rookgassen en hoe meer onvolledige verbranding. De CO₂/CO ratio is berekend door de gemeten CO₂ concentratie, verminderd met de CO₂ achtergrond concentratie van 546 ppm, door de CO concentratie te delen.

De hoogste gasconcentraties werden gemeten tussen 14:23 en 14:45 uur. Buiten deze periode waren de gemeten gasconcentraties vaak relatief laag, wat de impact van meetonzekerheden en meetafwijkingen vergroot.

Figuur 10 Een overzicht van de luchtconcentraties H₂O op de linker as (blauwe lijn) en de CO₂/CO ratio (oranje stippen) op de rechter as. De gemiddelde CO₂ achtergrond (546 ppm) is verminderd op de gemeten CO₂ concentratie. Onvolledige verbranding met relatief veel CO resulteert in een lage ratio terwijl meer volledige verbranding leidt tot relatief minder CO en een hoge ratio.



[Figuur 10] toont de invloed van blussing, gemeten middels de H_2O concentratie, op de mate van onvolledige verbranding middels een CO_2 -CO ratio. De CO_2 -CO ratio toont voor de blussing een relatief inconsistent beeld. Dit komt deels door fluctuaties in de rookgassamenstelling en de eerder beschreven meetafwijkingen bij lage gasconcentraties. Het is daarom beter voor de blussing van 14:23 uur naar de gemiddelde CO_2 -CO ratio te kijken. Deze bevindt zich gemiddeld rond 27 terwijl de ratio na de blussing (periode 14:23-14:45 uur) daalt naar een gemiddelde tussen 6 tot 7. Na 14:45 uur neemt de rookconcentratie af en stijgt de ratio. Dit geeft aan dat de CO concentratie sneller afneemt dan de CO_2 concentratie.

Belangrijk om te vermelden is dat onvolledige verbranding bij voertuigbranden, naast een toename van meer schadelijke gassen, ook leidt tot een toename in de vorming van onder andere roetdeeltjes en polycyclische aromatische koolwaterstofverbindingen (PAK). Emissies van PAK zijn bij dit experiment niet onderzocht.

5.2.6

Vergelijking gasconcentraties experiment 2 met interventiewaarden

De meetresultaten van de experimenten bieden een realistisch beeld van de gasconcentraties die kunnen voorkomen bij een brand. De kans is echter klein dat onbeschermden personen gedurende de gehele brandduur daadwerkelijk worden blootgesteld aan deze concentraties. Dit komt doordat mensen in veel gevallen instinctief zullen proberen uit de rook te blijven. Vanwege de vele variaties en bijhorende onzekerheden rondom een realistische blootstelling bij een buitenbrand, is ervoor gekozen om verwachtingen over gezondheidseffecten door blootstelling niet uitgebreid uit te werken. In deze paragraaf wordt echter wel beoordeeld in hoeverre interventiewaarden bij gasmetingen van het tweede experiment worden overschreden.

In onderstaande [Tabel 3] zijn de maximaal gemeten concentraties van verschillende stoffen weergegeven evenals vier relevante interventiewaarden, (zie interventiewaarden voor incidentbestrijding RIVM 2025 [15]), de AGW_{60}^{20} , de VRW_{60}^{21} , de VRW_{30} en de VRW_{10} per stof. Interventiewaarden zijn standaard weergegeven in mg/m^3 , maar zijn hier omgerekend in ppm (20 °C) voor betere vergelijking met de meetresultaten die in ppm zijn gerapporteerd.

Behalve voor cyaanwaterstof is de VRW voor de overige stoffen voor alle tijdsduren gelijk. Dit betekent dat de luchtconcentratie de drijvende factor is voor de gezondheidseffecten die kunnen optreden bij de VRW. Voor cyaanwaterstof heeft de tijdsduur invloed op het optreden van effecten. Voor koolmonoxide is een VRW niet afgeleid. Volgens het stofdocument van koolmonoxide kunnen gezondheidseffecten wel optreden beneden de AGW.

²⁰ AGW_{60} : ALarmeringsgrenswaarde. Dit is de luchtconcentratie waarboven onherstelbare of andere ernstige gezondheidseffecten kunnen optreden, of waarbij door blootstelling aan de stof personen minder goed in staat zijn zichzelf in veiligheid te brengen. Het getal 60 verwijst naar een 60 minuten blootstellingsduur waarbij deze effecten op zullen treden. Het getal 30 verwijst bij een AGW_{30} naar een 30 minuten blootstellingsduur en 10 bij een AGW_{10} naar een 10 min blootstellingsduur

²¹ VRW_{60} Voorlichtingsrichtwaarde de luchtconcentratie die met grote waarschijnlijkheid door de blootgestelde bevolking als hinderlijk wordt waargenomen, of waarboven lichte gezondheidseffecten mogelijk zijn. Het getal 60 verwijst naar een 60 minuten blootstellingsduur waarbij deze effecten op zullen treden. Het getal 30 van VRW_{30} naar een 30 minuten blootstellingsduur en 10 van VRW_{10} naar een 10 min blootstellingsduur

De VRW wordt voor fluorwaterstof, chloorwaterstof en formaldehyde overschreden. Voor cyaanwaterstof is dat alleen bij de VRW₆₀ het geval. Uit de tabel blijkt dat alleen de AGW₆₀ voor CO wordt overschreden. De AGW₃₀ van CO (154 ppm) die niet in de tabel is weergegeven wordt ook overschreden. Alle andere stoffen blijven onder de AGW.

Tabel 3 Maximaal gemeten rookgasconcentraties van koolmonoxide (CO), fluorwaterstof (HF), chloorwaterstof (HCl), cyaanwaterstof (HCN) en formaldehyde (HCOH) in ppm. In de rijen daaronder zijn in ppm de VRW₁₀, VRW₃₀, VRW₆₀ en AGW₆₀ concentraties weergegeven. Voor CO is geen VRW afgeleid.

	CO (ppm)	HF (ppm)	HCl (ppm)	HCN (ppm)	HCOH (ppm)
Max. concentratie	318	2	5	5	10
VRW ₁₀	n.v.t.	1	1,8	17	1
VRW ₃₀	n.v.t.	1	1,8	7,7	1
VRW ₆₀	n.v.t.	1	1,8	4,6	1
AGW ₆₀	83	24	33	6	14

In onderstaande [Tabel 4] wordt een overzicht gegeven van de tijdsduur waarin verschillende interventiewaarden worden overschreden. Deze tabel geeft een indruk van de duur van de verhoogde concentraties.

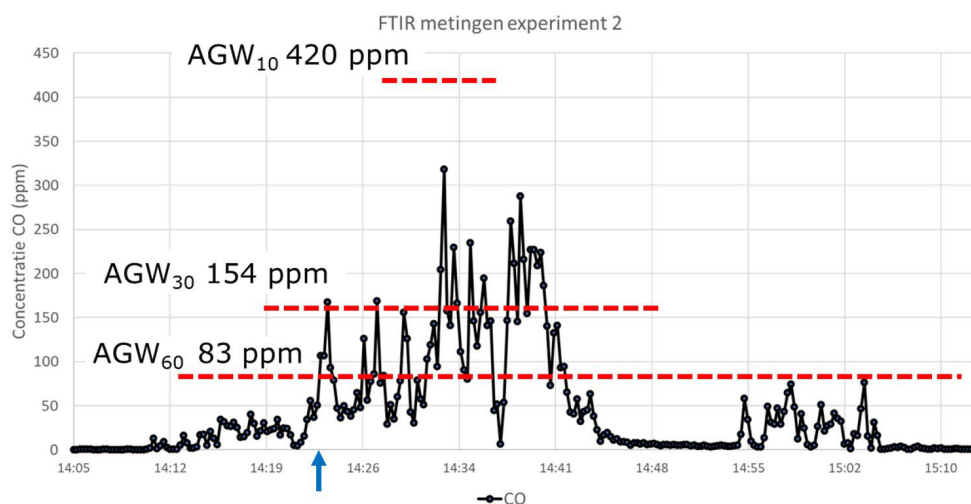
Tabel 4 De maximale duur in minuten waarbij de concentraties van de VRW₁₀, AGW₆₀ en AGW₃₀ worden overschreden.

	CO (min)	HF (min)	HCl (min)	HCN (min)	HCOH (min)
VRW ₁₀	n.v.t.	4,5	5,25	0	17,5
AGW ₆₀	11,5	0	0	0	0
AGW ₃₀	5,25	0	0	0	0

Zoals getoond in [Tabel 3] en [Tabel 4], zijn de gemeten luchtconcentraties fluorwaterstof, chloorwaterstof en formaldehyde hogere waarden dan de VRW en kunnen milde gezondheidseffecten optreden als luchtwegirritatie. Voor cyaanwaterstof is een voorspelling over mogelijke gezondheidseffecten lastiger, omdat de tijdsduur van blootstelling van deze stof ook van belang is. Cyaanwaterstof blijft onder de VRW₃₀ maar overschrijdt net de VRW₆₀ met de maximale gemeten concentratie gedurende 4,5 minuten. Het is niet aannemelijk dat een incident veel langer duurt dan 30 minuten (wat ook blijkt uit de blusperiode van het experiment) en de overschrijding van de conservatievere VRW₆₀ is relatief kort. Daarom is het niet te verwachten dat HCN in deze omstandigheden tot klachten zou leiden.

Van de in [Tabel 3] en [Tabel 4] weergegeven gassen lijkt CO het meest relevante toxische gas omdat dit gas als enige de AGW₃₀ en AGW₆₀ concentratie overschrijdt. Om een beter beeld te geven van het verloop van de gemeten concentraties is in [Figuur 11] de gemeten concentraties van CO weergegeven in combinatie met de hoogte en de duur van de interventiewaarden AGW₁₀, AGW₃₀ en AGW₆₀.

Figuur 11 Het verloop van de gemeten koolmonoxide (CO) concentraties bij experiment 2. AGW concentraties voor verschillende blootstellingsduur zijn in rood indicatief weergegeven met een lijnlengte die op de x-as een tijdsduur van 10, 30 en 60 minuten weergeeft. De eerste CO piek die de AGW₆₀ concentratie overschrijdt is gemeten tijdens de eerste blusactie om 14:23 uur (aangegeven blauwe pijl op x-as). De brand startte om 14:10 uur.



[Figuur 11] toont de CO concentratie die op 7 meter benedenwinds door de FTIR op +/- 1,50 m hoogte is gemeten. Vanaf het moment dat de AGW₆₀ van CO voor het eerst wordt overschreden (14:23 uur) tot het moment dat de concentratie onder de AGW₆₀ concentratie van CO komt (14:42 uur) is de gemiddelde CO concentratie 119 ppm. Zoals eerder aangegeven, is het niet uitgesloten dat gezondheidseffecten op kunnen treden beneden de AGW van koolmonoxide. Omdat de gemiddelde concentratie van 119 ppm gedurende bijna 20 minuten voortduurt is het niet uit te sluiten dat bij blootstelling ook ernstigere gezondheidseffecten optreden bij gevoelige personen.

De grafiek geeft enkele relevante waarnemingen weer die aansluiten bij de vorige paragraaf:

- Op het moment dat de auto het hevigst brandt (voor de eerste blussing) worden relatief lage concentraties CO gemeten.
- De CO concentraties nemen significant toe nadat de eerste blussing om 14:23 uur is ingezet.
- Op de meetlocatie benedenwinds variëren gasconcentraties continu en hevig.

Belangrijk punt van aandacht is dat het rookmengsel uit verschillende gassen bestaat die elkaars schadelijke gezondheidseffecten kunnen versterken. Bovendien bevat de rook meer schadelijke componenten dan hierboven weergegeven. Zo kunnen bijvoorbeeld stofgebonden componenten met corrosieve deeltjes (zoals lithium(hydr)oxiden) een relevante bijdrage leveren in de acute gezondheidseffecten bij blootstelling aan de rook (zie ook volgende paragraaf [5.3]). Hierdoor kunnen gezondheidseffecten die nu als mild worden beschreven verergeren. Daarnaast kunnen o.a. polycyclische aromatische koolwaterstofverbindingen (PAK) en zware metalen (nikkel en kobalt verbindingen) bij herhaalde blootstelling gezondheidseffecten op langere termijn geven.

5.2.7 *Fluorwaterstof emissies*

Uit de metingen blijkt dat de concentraties fluorwaterstof in de benedenwindse richting, in verhouding tot andere schadelijke gassen, geen hoog gezondheidsrisico vormen. Hoewel er een korte piek van 2 ppm is waargenomen, kan ook deze relatief lage concentratie nog een overschatting zijn van de werkelijk aanwezige concentratie. Dit argument wordt ondersteund door de lage correlatiefactor in de metingen van fluorwaterstof.

Deze lage concentraties zijn door meerdere redenen te verklaren. Ten eerste bevatten elektrische voertuigen, naast de li-ion-batterij als de voornaamste bron van fluorwaterstof (HF), ook andere materialen die weinig tot geen fluorwaterstof uitstoten. Door deze toevoeging van andere materialen worden de fluorwaterstofconcentraties verdund binnen het totale rookmengsel.

Ten tweede speelt ook het type lithium-ion-batterij een belangrijke rol. Onderzoek toont aan dat NMC batterijen over het algemeen lagere fluorwaterstof emissies geven. Bugryniec et al. 2024 [10] analyseerden ongeveer 60 tests met verschillende typen lithium-ion-batterijen en concludeerden dat de emissies van fluorwaterstof bij NMC-batterijen gemiddeld ongeveer een factor tien lager kunnen zijn dan bij LFP-batterijen. Dit impliceert dat onder vergelijkbare testomstandigheden hogere concentraties fluorwaterstof waarneembaar zouden zijn bij voertuigen met LFP-batterijen.

Ten slotte zijn bij sommige onderzoeken [2] naar fluoride (F^-)-emissies li-ion-batterijen langer en intensiever verhit dan wat een gemiddelde li-ion-batterijcel tijdens een elektrische autobrand zou ondergaan. Daarnaast is in sommige studies [2] voor een worst-caseberekening aangenomen dat alle fluoride (F^-) emissies afkomstig zijn van fluorwaterstof (HF). Wanneer deze emissies echter niet afkomstig zijn van fluorwaterstof, maar bijvoorbeeld van lithiumfluoride (LiF), kan dit leiden tot een overschatting van de fluorwaterstofemissies. Dergelijke factoren kunnen ervoor zorgen dat fluorwaterstofemissies in de praktijk lager zijn dan in laboratoriumomstandigheden wordt vastgesteld.

Relatief lage fluorideconcentraties worden eveneens waargenomen bij metingen van luchtstofconcentraties (zie paragraaf [5.3.3]) en depositie (zie paragraaf [6.3]). Hoewel deze fluoriden naar verwachting grotendeels niet afkomstig zijn van fluorwaterstof, maar van fluoride houdende zouten (zoals LiF en $LiPF_6$) uit de lithium-ion-batterijen, past dit in het beeld dat te verwachten is bij lage fluorwaterstofconcentraties. Zie ook paragraaf [8.3] voor meer toelichting over fluoride zouten in de li-ion-batterij.

5.3 **Rookstofconcentraties**

5.3.1 *Bemonsteringsomstandigheden*

Rookstof is bemonsterd vanaf de start van de brand. Als gevolg van een technisch mankement is één luchtstof bemonsteringsapparaat (vaste opstelling) eerder uitgevallen. Het tweede luchtstof-bemonsteringsapparaat in vaste opstelling heeft ook na de blussing nog enige tijd kunnen bemonsteren. Het mobiele luchtstof bemonsterings-

apparaat is vastgelopen op het moment dat de blussing begon. Vanaf dat moment namen de concentraties van rookdeeltjes bij het monsternamepunt sterk toe doordat de rook minder steeg en de filters snel verzadigd raakten. Daarnaast kan hoge luchtvochtigheid en toename van vorming van roetdeeltjes door onvolledige verbanding bijdragen aan het sneller verstopping van luchtmonsteringsfilters. Een overzicht van de bemonsteringslocatie, analysemethode en resultaten is weergegeven in onderstaande [Tabel 5].

Tabel 5 Overzicht van luchtmonstering resultaten van mobiele opstelling (+/- 7 m van de brand) en vaste opstelling (+/- 10 m van de brand). De concentraties en monsternameduur zijn gecorrigeerd naar een aanvangstijd van de rookemissies vanaf 14:10 uur.

Bemonstering locatie en analyse methode	Mobiel elementen	Vast elementen	Vast anionen
Bemonsterd stof (mg)	206	149	26
Concentratie stof (mg/m ³)	263	96	98
Bemonsteringsduur (minuten)	13	23	7
Bemonsterd volume (Nm ³) ²²	0,78	1,55	0,26

Omdat de bemonsteringsduur en soms ook de bemonsteringslocatie variëren, kunnen meetwaarden niet zonder meer met elkaar vergeleken worden en moeten meetwaarden van rookstofconcentraties met voorzichtigheid worden geïnterpreteerd. De resultaten reflecteren voornamelijk de rooksamenstelling aan het begin van de brand en zijn niet representatief voor de gehele brandduur. De rookstofmonsters van het vaste luchtmonsteringsapparaat, waarop de elementen zijn geanalyseerd, bieden waarschijnlijk het meest representatieve beeld van de gemiddelde rookstofsamenstelling tijdens de brand omdat deze het langst bemonsterd heeft.

5.3.2 Elementen

Met ICPMS zijn de gehalten van 29 metalen bepaald, waarvan in [Tabel 6] een selectie is weergegeven. De geanalyseerde metalen vormen bij beide monsterpunten ongeveer 1,5 massaprocent van de totaal opgevangen hoeveelheid rookstof. Naar verwachting zal het grootste deel van de rookdeeltjesmassa uit koolstof verbindingen bestaan. Een selectie van metalen met een waargenomen concentratie hoger dan 20 µg/m³ is weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 6 Selectie van luchtconcentraties van elementen in µg/m³ die in hogere concentraties dan 20 µg/m³ aangetroffen zijn. Lithium (Li), magnesium (Mg), aluminium (Al), mangaan (Mn), nikkel (Ni), kobalt (Co), zink (Zn)

Opstelling luchtstof bemonstering	Li (µg/m ³)	Mg (µg/m ³)	Al (µg/m ³)	Mn (µg/m ³)	Ni (µg/m ³)	Co (µg/m ³)	Zn (µg/m ³)
Mobiel	113	1627	95	47	250	50	1077
Vast	123	287	85	61	352	71	209

²² Een Nm³ (normaal kubieke meter) geeft het gasvolume aan dat is omgerekend naar een temperatuur van 0 °C en een luchtdruk van 1 atmosfeer.

In deze tabel zijn een aantal kenmerken zichtbaar:

- De massaverhouding tussen de kathodematerialen Mn - Ni en Co - Ni ligt in orde grootte 1:5 tot 1:6. Deze verhouding past bij de fingerprint van een NMC li-ion-batterij type NMC611 of type NMC511. Dit wijkt af van de door de leverancier opgegeven kathodesamenstelling (NMC622). In een NMC611 kathode is de molverhouding van nikkel, mangaan en kobalt 6:1:1. Dit betekent dat er zes mol nikkel aanwezig is voor elke mol mangaan en kobalt. Omdat de atoommassa's van nikkel (58,69 u), mangaan (54,94 u) en kobalt (58,93 u) weinig verschillen geven de massaverhoudingen een redelijk beeld van de molverhoudingen van deze elementen. Dit geldt niet voor lithium (atoommassa 6,94 u)
- De waargenomen lithium concentraties zijn relatief hoog. De massaverhouding Li:Ni is ongeveer 1:2 tot 1:3. In molverhouding is dit voor de verhouding Li:Ni ongeveer 4:1 tot 3:1.
- De magnesiumconcentratie van de mobiele monsteropstelling lijkt buitenproportioneel hoog. Deze meetwaarde is echter goed verklaarbaar doordat voor de blussing een metaalbrand (met fel licht) in een stoelframe aanwezig leek te zijn. Bij aanvang van de blussing waren ook enkele explosies hoorbaar die passen bij het exploderen van waterstof, dat kan ontstaan bij het blussen van een magnesiumbrand met water. De magnesium meetwaarde van de vaste opstelling is beduidend lager doordat de wind niet in de richting van de vaste opstelling waaide op het moment van de metaalbrand en doordat de bemonstering nog ruim 10 minuten werd voortgezet na blussen van de magnesium brand.
- De zinkwaarden tonen een gelijke trend met de magnesium waarden. Dit zou mogelijk kunnen betekenen dat de hierboven beschreven metaalbrand uit een magnesium-zinklegering bestond. Er zijn echter ook andere zinkbronnen mogelijk zoals gegalvaniseerde carrosserieonderdelen en elektrische componenten.

De monsterekop van het mobiele luchtstofbemonsteringsapparaat bevond zich direct naast de sonde van de gas-FTIR. Daarom kunnen rookstofconcentraties van dit monsterpunt vergeleken worden met gemeten gassen uit dezelfde periode. Uit deze vergelijking blijkt dat voor iedere milligram koolmonoxide (CO) per m³ ongeveer 5 microgram lithium per m³ gemeten is. Deze vergelijking is indicatief en geldt alleen voor het gemiddelde van de eerste 14 minuten van de brand, waarin de bijdrage van de batterij aan de brand nog relatief gering leek te zijn. Wanneer wordt aangenomen dat alle lithium in rook vrijkomt als lithiumhydroxide dan is er per milligram CO ongeveer 17 µg lithiumhydroxide vrijgekomen (ofwel 12 µg hydroxide).

5.3.3

Anionen

In [Tabel 7] worden de anionenconcentraties weergegeven die gedurende de eerste 7 minuten van de brand zijn bemonsterd. Vanwege een technisch mankement is deze bemonstering gestopt voordat de bluswerkzaamheden begonnen. Uit de tabel blijkt dat met name de chloride concentraties hoog zijn. Dit komt overeen met de relatief hoge HCl-emissies aan het begin van de brand, wat erop wijst dat het element chloor in aanzienlijke hoeveelheden in de brandstof aanwezig is.

Daarnaast valt op dat de fluoride concentraties relatief laag zijn. Dit geeft de indruk dat de emissies in het batterijpakket nog relatief gering is bij aanvang van de brand. Ook overige meetwaarden zijn relatief laag. Dit beeld past bij de gasmetingen met FTIR over dezelfde periode.

Tabel 7 Selectie van ionenconcentraties per m³ van de eerste 7 minuten van de brand bemonsterd op de vaste locatie.

Opstelling luchtstof bemonstering	F ⁻ (µg/m ³)	Cl ⁻ (µg/m ³)	Br ⁻ (µg/m ³)	NO ₃ ⁻ (µg/m ³)	SO ₄ ²⁻ (µg/m ³)	PO ₄ ³⁻ (µg/m ³)
Vast	96	669	29	13	48	53

De massaverhoudingen tussen de vaste opstelling van luchtstof-bemonstering van fluoride en lithium (factor 1,3 verschil) zijn niet zonder meer met elkaar te vergelijken omdat de bemonsteringsperiode ongelijk is.

6 Meetresultaten depositie

6.1 Verschil in depositie tussen experiment 1 en 2

Depositiemonsters zijn bij beide experimenten gedurende de gehele brand verzameld op een afstand van ongeveer 10 meter benedenwinds van de brand. In tegenstelling tot gasmetingen en bluswatermonsters zijn de depositiemetingen van beide experimenten technisch goed verlopen. Verschillen in meetwaarden zijn voornamelijk een weergave van effecten van rookgasemissie, pluimstijging, brandverloop en brandduur. De meetresultaten van depositie zijn kenmerkend voor een elektrische autobrand. De blusmethode heeft voornamelijk invloed op de duur van de depositieafzetting en de daarmee samenhangende hoeveelheid depositie per oppervlakte-eenheid.

Doordat de windrichting en de samenstelling van de rook tijdens het experiment doorlopend veranderde, zijn verhoudingen van verschillende stoffen tussen verschillende depositielocaties ook anders.

De gemiddelde hoeveelheid depositie (in mg/m^2) is bij experiment 2 voor de meeste metalen een factor 4 tot 7 hoger dan vergeleken met experiment 1. Voor anionen is dit een factor 1 tot 3.

Het verschil in de hoeveelheid depositie tussen deze experimenten hangt naar verwachting voornamelijk samen met de intensiteit waarmee onderdelen van het voertuig, met name de batterij, hebben gebrand. Hoewel de windsnelheid tijdens experiment 1 gemiddeld iets hoger was, vormt dit niet een verklaring voor de aanzienlijk lagere depositiewaarden ten opzichte van experiment 2. Het beeld dat er bij experiment 1 een deel van de brand ook meer pluimstijging was kan ook bijdragen aan lagere depositiehoeveelheden dichtbij de bron.

In [Bijlage 3] zijn depositiewaarden van lithium, nikkel en kobalt ook op meer visuele wijze weergegeven.

6.2 Depositie elementen experiment 1 en 2

Hoewel de in [Tabel 1] weergegeven windrichting tijdens experiment 1 hoofdzakelijk vanuit 250 graden kwam, lijkt de depositie van batterij specifieke metalen (lithium, nikkel, mangaan en kobalt) redelijk gelijkmatig verdeeld te zijn over de depositie vlakken. Dit geldt niet voor het element zink, dat voornamelijk in een specifieke richting is neergeslagen (locatie 3 en 4). Het lijkt erop dat de emissie van zink kortdurend en intens was, terwijl de emissies uit de li-ion-batterij juist langer aanhielden en minder intens waren.

Tabel 8 Depositiemeetwaarden per element bij experiment 1 weergegeven in mg/m² voor depositielocatie 1-5 benedenwinds van de brand.

	1 (mg/m ²)	2 (mg/m ²)	3 (mg/m ²)	4 (mg/m ²)	5 (mg/m ²)
Li	2,3	4,6	1,1	1,0	1,3
Mg	6,1	11	17	21	8,6
Al	7,4	16	12	13	9,8
Fe	31	52	21	22	15
Mn	2,2	4,2	2,2	1,5	1,5
Ni	21	39	18	11	14
Co	3,6	6,8	3,1	1,8	2,3
Cu	2,6	4,9	9,4	10	5,0
Zn	7,3	10	103	109	22

Meetwaarden van experiment 2 tonen dat depositie van kortdurende emissies op de direct benedenwindse bodem bij de op dat moment heersende windrichting is te vinden. Dit is bijvoorbeeld zichtbaar bij depositielocatie 5 die zich tijdens de metaalbrand benedenwinds bevond. Deze locatie toont sterke verhoging van magnesium, zink en aluminium. Een deel van deze elementen kan zijn vrijgekomen tijdens de kortdurende metaalbrand.

Tabel 9 Meetresultaten van elementen bij experiment 2 weergegeven in mg/m² voor depositielocaties 1-6 benedenwinds van de brand.

Depositie locatie	1 (mg/m ²)	2 (mg/m ²)	3 (mg/m ²)	4 (mg/m ²)	5 (mg/m ²)	6 (mg/m ²)
Li	0,2	0,7	2,7	12	16	24
Mg	1,0	2,2	7,9	36	187	34
Al	0,6	2,6	12	41	124	83
Fe	1,3	1,2	2,8	13	55	52
Mn	0,3	0,9	3,2	14	36	32
Ni	2,3	8,4	30	130	339	315
Co	0,4	1,4	5,1	22	56	52
Cu	0,2	7,4	3,8	11	39	28
Zn	0,5	0,8	2,4	27	193	55

De li-ion-batterij van het voertuig heeft bij experiment 2 met name hevig gebrand op het moment dat de wind over locaties 4, 5 en 6 ging. Op deze posities zijn sterk verhoogde nikkelwaarden gevonden. De kobaltwaarden zijn consistent een factor 6 lager dan nikkel terwijl de mangaanwaarden ongeveer 9 maal lager zijn dan nikkel.

De verhouding tussen de NMC kathodematerialen is bij depositie metingen anders dan bij de luchtmetingen. De molverhouding Ni:Co is 6:1 wat past bij een NMC611 batterij. De molverhouding Ni:Mn is echter 8:1 tot 9:1 wat beter past bij een NMC811 batterij.

6.3 Depositie anionen experiment 1 en 2

In [Tabel 10] en [Tabel 11] worden de meetresultaten van anionen weergegeven. Bij experiment 1 zijn de hoeveelheden chloriden gemiddeld 9 keer hoger dan die van fluoriden, terwijl dit bij experiment 2 gemiddeld 3 tot 4 keer zo hoog is. Dit verschil in verhouding is te verklaren doordat fluoriden voornamelijk afkomstig zijn van de batterij. Aangezien de batterij bij experiment 1 minder betrokken was bij de brand, zijn de hoeveelheden fluoriden per vierkante meter in dit experiment lager.

Tabel 10 Meetresultaten van anionen per vierkante meter op verschillende depositielocaties benedenwinds van de brand bij experiment 1.

Depositie locatie	1 (mg/m ²)	2 (mg/m ²)	3 (mg/m ²)	4 (mg/m ²)	5 (mg/m ²)
Fluoride	1,8	2,2	0,6	0,1	0,4
Chloride	1,9	8,0	21,1	12,7	1,6
Bromide	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1
Nitraat	0,2	0,1	0,1	0,6	0,2
Sulfaat	1,2	2,4	9,4	8,4	3,7
Fosfaat	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1
Jodide	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1

Bij experiment 2 is chloride vooral sterk verhoogd op een monsterlocatie (nr 5). Dit is dezelfde monsterlocatie waar magnesium en zink sterk verhoogd zijn door de metaalbrand voor de eerste blussing met lage drukstralen. Naast verhoogd chloride is verhoogd sulfaat op monsterlocatie 5 zichtbaar. Bij experiment 1 is ook verhoogd sulfaat aangetroffen. Een mogelijke bron van sulfaten zijn zwavelverbindingen uit de autobanden, andere bronnen zijn ook mogelijk. De hoeveelheden fosfaat zijn bij alle depositiemetingen relatief laag. Bij een autobrand met lithium-ijzerfosfaat (LFP) batterijen zullen deze hoeveelheden naar verwachting significant hoger zijn.

Tabel 11 Meetresultaten van anionen per vierkante meter op verschillende depositielocaties benedenwinds van de brand bij experiment 2.

Depositie locatie	1 (mg/m ²)	2 (mg/m ²)	3 (mg/m ²)	4 (mg/m ²)	5 (mg/m ²)	6 (mg/m ²)
Fluoride	0,1	0,5	0,8	4,8	3,5	6,6
Chloride	0,5	2,9	3,3	2,0	44,0	11,7
Bromide	0,0	0,0	0,0	0,1	0,6	0,1
Nitraat	0,1	0,1	0,3	0,4	1,7	0,2
Sulfaat	0,6	1,7	3,3	4,4	24,4	5,8
Fosfaat	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1
Jodide	0,0	0,0	0,2	1,0	0,2	0,1

6.4 Massaverhouding anionen-elementen experiment 2

Wanneer de massaverhoudingen tussen [Tabel 9] (elementen experiment 2) en [Tabel 11] (anionen experiment 2) worden vergeleken, blijkt dat de verhouding tussen lithium en fluoride varieert van een factor 1,6 tot 4,6. Dit suggereert dat er enige samenhang is tussen de emissies van lithium en fluoride. In contrast hiermee vertoont de massaverhouding tussen lithium en chloride een slechtere correlatie, met variaties van een factor 0,2 tot 5,9. Dit wijst erop dat fluoride voornamelijk uit de batterij afkomstig is, terwijl chloride waarschijnlijk voor een aanzienlijk deel uit een andere bron komt. Bij de gasmetingen is een vergelijkbaar patroon zichtbaar: waterstofchloride (HCl) wordt vooral aan het begin van de brand gemeten, wanneer chloorhoudende kunststoffen verbranden.

6.5 Verhoging pH in depositie

Randen van de depositiebakken werden niet bemonsterd. Voor een indicatief beeld van de effecten van de pH-waarde door depositie, is op de randen van de bakken vochtig pH papier gedrukt²³. Hierbij zijn verhoogde pH-waarden aangetroffen tot maximaal pH 9-10 op de bak met hoogste lithiumconcentratie (24 mg/m²). De coating van sommige monsternameapparatuur was na het experiment ook licht aangetast door de corrosieve eigenschappen van de depositie uit de rook.

²³ N.B. de wijze waarop pH papier wordt gebruikt kan meetresultaten sterk beïnvloeden. Wanneer met pH papier een groot oppervlak wordt bestreken, worden meer hydroxiden opgenomen en zal de pH hoger uitslaan dan wanneer het pH papier slechts op één plek wordt aangedrukt. Bij deze pH meting is de laatste methode gehanteerd.

7 Meetresultaten bluswater

7.1 Omstandigheden

Tijdens de test zijn op verschillende momenten bluswatermonsters genomen op de bodem tussen de waterkering en het brandende voertuig [zie Figuur 2]. Na de inzet van het UHD-systeem was op diverse plekken op de bodem een aanzienlijke toename van zwart sediment in het bluswater zichtbaar. Op deze plekken zijn monsters genomen. Deze monsters zijn verzameld door met een beker over de bodem te strijken, waarbij zowel vaste deeltjes als bluswater werden meegenomen. Hierdoor is de verhouding tussen vaste niet-oplosbare deeltjes en opgeloste ionen in het bluswater redelijk willekeurig. Daarnaast is er een watermonster genomen uit de tankwagen die het bluswater verzamelde. De operator van de tankwagen heeft aangegeven dat er bij de eerste proef 2 m³ bluswater is afgepompt en bij de tweede proef 8 m³. Bluswatermonsters uit de tankwagen zijn aan het eind van de eerste dag genomen, nadat het bluswater van beide experimenten was opgezogen. Monsters zijn genomen direct nadat de inhoud van de tank was gemengd. Dit maakt dat er twee soorten bluswatermonsters zijn, monsters van de bodem en monsters uit de tankwagen. Wanneer in dit hoofdstuk over monsters van de bodem wordt gesproken gaat het niet letterlijk om bodemmonsters (waarbij bijvoorbeeld grond tot een diepte van 10 cm wordt verzameld), maar om monsters die van het bluswater en sediment op de bodem genomen zijn, zoals hierboven beschreven.

Bluswatermonsters van de bodem geven een indicatief beeld doordat bluswaterstromen op de monsterlocatie niet homogeen vervuild waren, waardoor grote concentratieverschillen mogelijk zijn. Goed-oplosbare ionen (lithium) van bluswatermonsters van afvalwater uit de tankwagen zullen echter wel een representatief beeld geven van het gemiddelde van de tankwageninhoud.

Het nemen van bluswatermonsters werd soms gehinderd door veiligheidsmaatregelen, waardoor niet alle gewenste momenten zijn bemonsterd. Van experiment 1 zijn te weinig monsters beschikbaar om mee te nemen in de beoordeling. Deze meetwaarden zijn wel weergegeven in [Bijlage 7]. Voor de beoordeling van bluswater zijn uitsluitend meetwaarden afkomstig van experiment 2 meegenomen.

Bluswatermonsters zijn met ICPMS op elementen geanalyseerd en met ionchromatografie op het gehalte van anionen. De monsterbehandeling beïnvloedt de resultaten van elementenanalyse. Gefilterde monsters geven een beeld van de oplosbare ionen in de vloeistof (supernatant). Het filterresidu toont voornamelijk onoplosbare elementen. Ongefilterde monsters tonen zowel oplosbare als onoplosbare delen. Ongefilterde monsters zijn geanalyseerd door het monsterpotje te schudden en vervolgens direct de te analyseren vloeistof uit het potje te nemen. De concentraties van slecht- of niet-oplosbare stoffen zijn vooral afhankelijk van de wijze van monsternamen en geven daarom geen representatief beeld van het gehalte. De verhoudingen tussen slecht-oplosbare stoffen

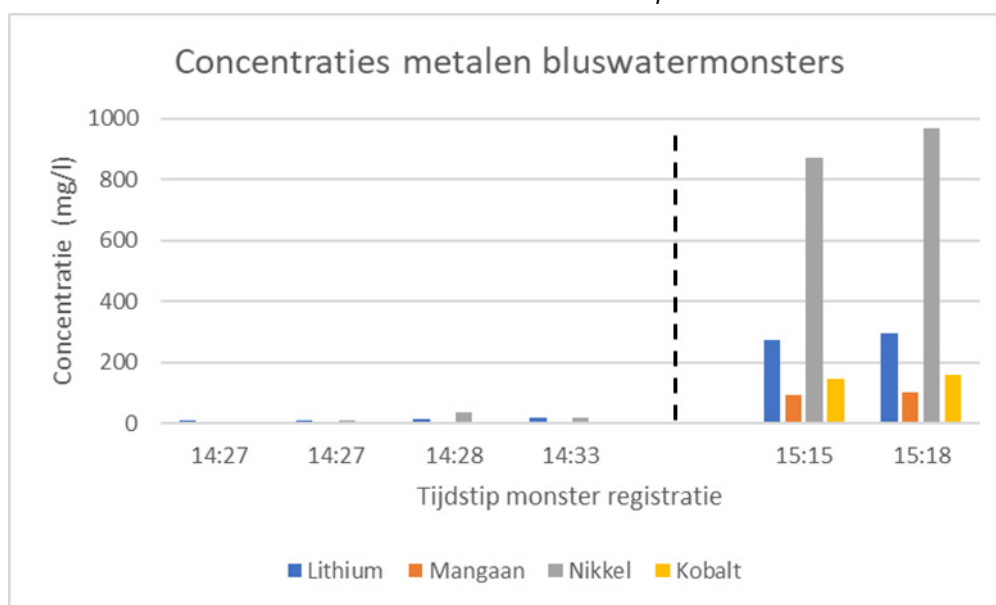
onderling kunnen wel met elkaar vergeleken worden. Dit is relevant omdat het kathodemateriaal van de NMC batterij slecht oplosbaar is in water evenals de eventueel bij brand gevormde oxiden van nikkel, mangaan en kobalt.

7.2 Visuele weergave gehalte per bluswatermonster

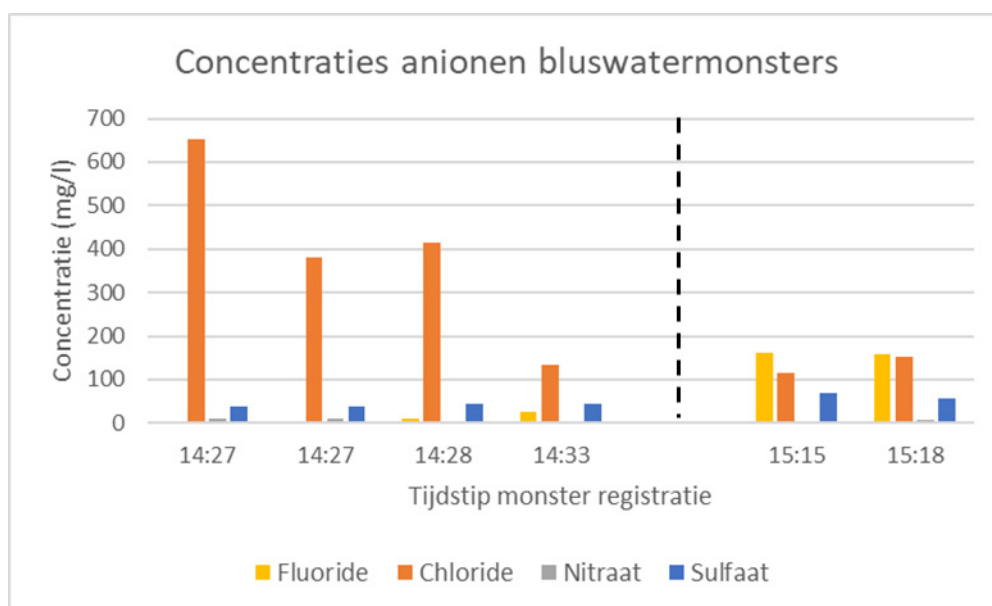
Bij experiment 2 zijn meerdere bluswatermonsters in twee series op de bodem genomen. De eerste serie is na de eerste blusactie met lage druk stralen (traditionele blusmethode) maar voor inzet van het UHD-systeem genomen. De tweede serie is genomen na de inzet van het UHD-systeem. De verhouding tussen de gemeten concentraties voor- en na het gebruik van het UHD-systeem zijn in [Figuur 12] en [Figuur 13] weergegeven. Het betreft hier een selectie van gemeten stoffen. Deze resultaten zijn voor een toegankelijke vergelijking van elementen en anionen visueel weergegeven op één pagina.

De gemiddelde concentraties van deze series zijn gedetailleerder weergegeven in de volgende paragraaf [7.3] en [7.4], in [Tabel 12] en [Tabel 13]. In [Bijlage 7] zijn meetresultaten van alle elementen in het bluswater weergegeven.

Figuur 12 Concentraties van een selectie elementen in mg/L uit de genomen monsters van de bodem. De monsters tot en met 14:33 uur (voor stippellijn) zijn genomen voor de inzet van het UHD-systeem. De monsters vanaf 15:15 uur (na stippellijn) zijn genomen na inzet van het UHD-systeem. N.B. de monsternamen beïnvloedt de concentratie van slecht-oplosbare stoffen.



Figuur 13 Concentraties van een selectie anionen in mg/L uit de genomen monsters van de bodem. De monsters tot en met 14:33 uur (voor stippellijn) zijn genomen voor de inzet van het UHD-systeem. De monsters vanaf 15:15 uur (na stippellijn) zijn genomen na inzet van het UHD-systeem.



7.3 Elementen

In [Tabel 12] en [Tabel 13] zijn meetresultaten van verschillende monsters weergegeven. Van de bluswatermonsters van de bodem is gekozen de gemiddelden weer te geven van de twee series van voor- en na de inzet van het UHD-systeem. De kolom met gefilterd water toont dat vooral lithiumionen in hoge concentraties aanwezig zijn. Verbindingen met nikkel, mangaan en kobalt uit NMC kathode lossen nauwelijks op in water. Dit beeld past bij andere metingen van bluswater van li-ion-branden zoals beschreven in RIVM rapport 2021-0019 [8].

De magnesiumconcentratie in het bluswater is bijna gelijk aan de concentratie van een verzadigde oplossing van magnesiumhydroxide (9 mg/L). Dit lijkt te passen bij het beeld dat magnesiumoxide (uit de metaalbrand) in contact met water wordt omgezet in magnesiumhydroxide. Verhoogde aluminium waarden zijn minder goed verklaarbaar omdat aluminiumoxide slecht oplosbaar is. Mogelijk heeft een basisch karakter van het bluswater invloed op de aanwezigheid van aluminium in de oplossing. Alle andere weergegeven metalen zijn in significant lagere hoeveelheden aanwezig.

Tabel 12 Elementengehaltes in verschillende bluswatermonsters

	Gemiddelde bodem voor inzet UHD (ongefilterd) (mg/L)	Gemiddelde bodem na inzet UHD (ongefilterd) (mg/L)	Tankwagen (gefilterd) (mg/L)
Li	12,3	286	36
Mg	22,6	82	7,4
Al	7,6	362	5,3
Fe	2,1	20	0,062
Mn	2,1	97	0,21
Ni	16,2	920	0,31
Co	2,8	152	0,068
Cu	1,7	42	0,083
Zn	7,6	64	0,058

De eerste twee kolommen van [Tabel 12] geven het verschil tussen bluswaterconcentraties van voor- en na de inzet van het UHD-systeem weer. Zoals eerder aangegeven, zijn hierbij vooral oplosbare lithiumionen een goede indicator voor de mate van vervuiling van het bluswater. Dit is omdat de monsternamen van de hoeveelheid sediment minder invloed heeft op de lithiumconcentraties.

De resultaten na inzet van het UHD-systeem tonen dat lithium concentraties ongeveer 25 maal hoger zijn dan voor de inzet met het UHD-systeem. Het verschil met nikkel, mangaan en kobalt is met ongeveer een factor 50 aanzienlijk hoger. Omdat de monsters ongeveer 30 minuten na aanvang van de inzet met het UHD-systeem zijn genomen, is het waarschijnlijk dat er verdunning van lithium is opgetreden als gevolg van doorlopend gebruik van bluswater. Het is

daarom waarschijnlijk dat de weergegeven gehalten van oplosbare stoffen bij aanvang van de UHD-inzet hoger zijn geweest dan weergegeven in de tabel. Na inzet van het UHD-systeem was er veel donker tot zwart sediment zichtbaar op de bodem rondom het gebluste voertuig. Dit sediment was voor de UHD-blussing nog niet aanwezig. Het is aannemelijk dat dit sediment voor een groot deel uit batterijdeeltjes (anode en kathodemateriaal) bestond dat door de UHD-blussing uit de batterijbehuizing is gespoeld.

De elementen kobalt en nikkel zijn in het gefilterde water in 100 tot 500 maal lagere concentraties aanwezig dan lithium, terwijl deze verhoudingen in ongefilterde monsters tot maximaal een factor 5 verschillen. Het verschil in oplosbaarheid is relevant omdat goed-oplosbare stoffen mobiel zijn en zich sneller in het milieu kunnen verspreiden dan (relatief grote) niet-oplosbare deeltjes.

Over de in dit hoofdstuk beschreven meetresultaten zijn een aantal opmerkingen te maken en waarnemingen te delen:

1. Als een groot deel van de in [Tabel 12] aangetroffen hoeveelheden lithium (286 mg/L) in de vorm van (opgelost) lithiumhydroxide (LiOH) voorkomt, kan dit leiden tot een aanzienlijke toename van de pH in het bluswater. Hoewel er geen pH-meting is uitgevoerd op het bluswater na de UHD-blussing, kan bij een (niet realistische worst case benadering) een pH $\approx 12,6$ worden verwacht als 286 mg/L lithium volledig afkomstig is van lithiumhydroxide (LiOH), mits er geen neutraliserende stoffen in het water aanwezig zijn. De hydroxide concentratie zou dan ongeveer 41,2 mmol/L zijn. Dergelijke hydroxiden concentraties zijn in de praktijk niet realistisch bij een lithiumgehalte van 286 mg/L (zie ook hoofdstuk 8.3), maar het is zeker niet uit te sluiten dat de pH in het bluswater oploopt tot boven pH 11,5 en volgens de Europese CLP-verordening als sterk alkalisch of corrosief moet worden beschouwd.
2. Tijdens een screening van het sediment uit het bluswater bleek dat een groot deel van het sediment (para)magnetische eigenschappen had. Met een magneet is de magnetische fractie gescheiden van de andere deeltjes sediment. XRF screening toonde aan dat in de met magneet gescheiden fractie o.a. sterk verhoogd nikkel, kobalt, mangaan en ijzer aanwezig was.
3. De verhouding tussen Ni:Co:Mn sluiten redelijk aan bij het beeld wat in de luchtconcentraties en depositie zichtbaar is. In het bluswater is de molverhouding Ni:Co gemiddeld 6:1 terwijl de molverhouding van Ni:Mn gemiddeld 8:1 is.

7.4 Anionen

Onderstaande [Tabel 13] toont gemeten gehalten van ionen in de verschillende bluswatermonsters. Alle ionen zijn in oplossing aanwezig waardoor monsterbehandeling geen verschillen geeft zoals bij elementen analyse. De tabel toont dat de fluoride concentraties 18 maal toenemen na inzet van het UHD-systeem, terwijl de chloride concentraties ongeveer met een factor 3 afnemen na inzet van het UHD-systeem. De sterke toename van de fluoriden past bij het beeld dat deze anionen uit de li-ion-batterij afkomstig zijn.

Tabel 13 Anionen-concentraties van verschillende bluswatermonsters

	Gemiddelde voor inzet UHD (mg/L)	Gemiddelde na inzet UHD (mg/L)	Tankwagen (mg/L)
Fluoride	9,1	160	29,3
Chloride	359	134	147
Bromide	2,3	7,3	2,5
Nitraat	6,1	5,6	3,4
Sulfaat	41,0	63,3	51,8

Net als de HCl-concentraties van de gasmetingen zijn de chloride-concentraties bij aanvang van de brand hoog waarna deze dalen. Zoals beschreven bij de depositiemetingen zijn verbrandingsproducten van chloorhoudende kunststoffen uit de cabine de belangrijkste bron van HCl- en Cl⁻-emissies. De bromide en nitraat hoeveelheden zijn over het algemeen laag. Dit geeft de indruk dat geen grote hoeveelheden HBr en/of NO_x vrijkomen bij de brand. De sulfaatconcentraties zijn gedurende de brand verhoogd en relatief constant. Dit sluit niet aan bij het beeld dat autobanden de bron van sulfaat zijn omdat deze autobanden niet meer betrokken waren bij de brand tijdens de inzet van het UHD-systeem. Daarnaast hebben de banden beperkt meegebrand.

8 Analyse en discussie rookstof en depositie

8.1 Algemeen

De depositie van stoffen bij een li-ion-batterijbrand hangt nauw samen met de samenstelling en verspreiding van rook. Om die reden zijn deze twee aspecten gezamenlijk uitgewerkt. Aangezien de analyse en onderdelen die passen bij een discussie in elkaar overlopen, zijn ook deze gecombineerd in dit hoofdstuk.

Een kenmerkende eigenschap van NMC li-ion-batterijen is het vrijkomen van de elementen lithium, nikkel, mangaan en kobalt. Dit hoofdstuk richt zich daarom uitsluitend op onderwerpen die verband houden met deze specifieke elementen.

8.2 Verschillen samenstelling in rookstof en depositie

8.2.1 Meetwaarden in molverhouding

In Tabel 6 zijn de meetresultaten van rookstofmonsters in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ weergegeven en in [Tabel 8] en [Tabel 9] zijn de depositiemonsters in mg/m^2 weergegeven. In paragraaf [5.3.2] en [6.2] is geconstateerd dat de verhouding van de kathode-elementen nikkel, mangaan en kobalt in rookstof aansluiten bij een NMC511 of een NMC611 li-ion-batterij. Bij de depositiemetingen sloten de kobalt-nikkelverhoudingen goed aan bij een NMC611 li-ion-batterij terwijl de mangaan-nikkelverhoudingen beter bij een NMC811 li-ion-batterij passen.

Het valt op dat in verhouding met de toegepaste NMC622 li-ion-batterij in het voertuig het element nikkel in hogere concentraties aanwezig is dan kobalt en mangaan. Daarnaast valt op dat de verhouding tussen NMC kathodematerialen en lithium bij luchtmetingen en depositiemetingen geheel anders is. Deze afwijkingen zijn ook in andere onderzoeken waargenomen [18] en [20]. Om dit beter zichtbaar te maken zijn de massa's van het element lithium en nikkel uit [Tabel 6], [Tabel 8] en [Tabel 9] omgerekend in μmol in [Tabel 14] en [Tabel 15] (zie volgende pagina). Onderaan iedere tabel is een rij toegevoegd die de molverhouding Li:Ni weergeeft.

In een NMC 622 batterij is de molverhouding tussen de verschillende elementen Li:Ni:Mn:Co gelijk aan de verhouding 10:6:2:2. Dit betekent dat de verhouding Li:Ni in de batterij gelijk is aan $10/6 \approx 1,67$.

In de praktijk kan lithium in verhouding tot bovenstaande molverhouding in geringe overmaat aanwezig zijn voor onder andere eventuele verliezen voor lithium plating en dendrietvorming²⁴ [22], het vormen van de solid electrolyte interphase (SEI), en aanwezigheid van lithiumzouten (zoals LiPF_6). Deze hoeveelheden zijn gering en hebben daarom geen significante invloed op de totale lithium emissies. A. Manthiram, 2020 [21] beschrijft dat er ongeveer 5 atoomprocent lithium in overmaat wordt toegevoegd. Dit is gelijk aan 5 molprocent.

²⁴ Lithium plating is het proces waarbij metallisch lithium zich tijdens het opladen afzet op de anode, wat kan leiden tot capaciteitsverlies, verminderde levensduur en veiligheidsrisico's (brand of explosie) door dendrietvorming. Dendrieten zijn naaldachtige afzettingen die op de anode kunnen ontstaan.

Luchtmetingen uit [Tabel 14] laten zien dat de Li:Ni-verhouding hoger is (3,8 tot 3,0) dan de batterijverhouding (1,67). Dit duidt erop dat er, in verhouding tot de hoeveelheid die in de batterij aanwezig is, ongeveer twee keer zo veel lithium in het luchtmonster is aangetroffen.

Tabel 14 Rookstofmetingen van experiment 2 in $\mu\text{mol}/\text{m}^3$ van het element lithium en nikkel en de molverhouding lithium:nikkel

Opstelling luchtstof bemonsteringsapparaat	Mobiel	Vast
Li ($\mu\text{mol}/\text{m}^3$)	16,3	17,7
Ni ($\mu\text{mol}/\text{m}^3$)	4,3	6,0
Li:Ni	3,8	3,0

Depositiemetingen uit [Tabel 15] laten zien dat de Li:Ni verhouding lager is (0,4 tot 0,8) dan de batterijverhouding (1,67). Dit duidt erop dat er, in verhouding tot de hoeveelheid die in de batterij aanwezig is, ongeveer de helft van het lithium in depositie is aangetroffen.

Tabel 15 Depositiemetingen van experiment 2 in $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ van het element lithium en nikkel en de molverhouding lithium:nikkel

	1 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$)	2 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$)	3 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$)	4 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$)	5 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$)	6 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$)
Li	27	105	392	1680	2335	3388
Ni	39	143	516	2220	5780	5364
Li:Ni	0,7	0,7	0,8	0,8	0,4	0,6

De afwijking in patronen tussen lithium en nikkel (en daarmee ook kobalt en mangaan) geeft informatie over de emissiesnelheid van lithium en het verschil in deeltjesgrootte tussen lithium en NMC kathodematerialen:

- Verschil in emissiesnelheid: Wanneer de lithiumemissies in de rook hoger zijn aan het begin van de brand, kan dit resulteren in een verschil in samenstelling tussen luchtmetingen en depositiemetingen. Dit verschil ontstaat doordat luchtmetingen voornamelijk zijn uitgevoerd tijdens de vroege fase van de brand, terwijl depositiemetingen materiaal verzamelen dat gedurende de hele brand is vrijgekomen. De vaste opstelling heeft langer lucht bemonsterd dan de mobiele opstelling. Het valt op dat de verhouding bij de vaste opstelling minder afwijkt van de batterijsamenstelling dan de mobiele opstelling. Dit bevestigt deze hypothese.
- Verschil in deeltjesgrootte: Als lithium in verhouding meer vrijkomt in kleinere deeltjes dan NMC kathodemateriaal, dan kan het lithium door windinvloeden over een groter gebied verspreid worden. Hierdoor zijn lithiumhoeveelheden per oppervlakte-eenheid dicht bij de brand lager. In dat geval zouden de NMC-metalen, die voornamelijk in relatief grotere en zwaardere deeltjes voorkomen, dicht bij de brand neerdalen. In vergelijking met lithium zullen nikkel, mangaan en kobalt in depositie over het algemeen vooral lokaal verhoogd zijn.

8.2.2 *Emissiesnelheid bij thermal runaway*

Voor een toelichting van de emissiesnelheid is het verloop van een thermal runaway relevant. Kai Liu et al. 2018 [16] en Depeng Kong et al. 2023 [19] beschrijven het verloop van een thermal runaway in een lithium-ion-batterij in drie fasen:

Faseverloop thermal runaway

Fase 1: Initiatie ($T < \approx 90^\circ\text{C}$)

Tijdens fase 1 verandert de werking van de batterij van een normale naar een abnormale toestand, de batterij raakt oververhit. Wanneer de interne temperatuur begint te stijgen, eindigt fase 1 en begint fase 2.

Fase 2: Warmteophoping en gasvrijmakingsproces ($T \approx 90\text{--}200^\circ\text{C}$)

Wanneer fase 2 begint, stijgt de interne temperatuur snel en ondergaat de batterij de volgende reacties (deze reacties vinden niet exact in de aangegeven volgorde plaats; sommige kunnen gelijktijdig plaatsvinden):

Afbraak van de solid electrolyte interphase (SEI²⁵) door oververhitting of fysieke penetratie. De SEI-laag bestaat voornamelijk uit stabiele componenten (zoals LiF en Li_2CO_3) en metastabiele componenten [zoals polymeren, ROCO_2Li , $(\text{CH}_2\text{OCO}_2\text{Li})_2$ en ROLi]. De metastabiele componenten kunnen echter exotherm (onder warmteafgifte) ontleden bij ongeveer $>90^\circ\text{C}$, waarbij brandbare gassen en zuurstof vrijkomen. Neem bijvoorbeeld $(\text{CH}_2\text{OCO}_2\text{Li})_2$.

Met de afbraak van de SEI stijgt de temperatuur verder, en reageert het lithium uit de SEI of het geïntercaleerde lithium²⁶ in de anode met de organische oplosmiddelen in het elektrolyt, waarbij brandbare koolwaterstofgassen (zoals ethaan, methaan en andere) vrijkomen. Dit is een exotherme reactie die de temperatuur verder verhoogt.

Wanneer de temperatuur hoger is dan $\sim 130^\circ\text{C}$, begint de separator van polyethyleen (PE) of polypropyleen (PP) te smelten, wat de situatie verder verergert en leidt tot een kortsluiting tussen de kathode en de anode.

Uiteindelijk veroorzaakt de hitte de ontbinding van het kathodemateriaal van lithium-metaaloxide, waardoor zuurstof vrijkomt.

Fase 3: Thermal runaway ($T > \approx 200^\circ\text{C}$)

Snelle temperatuurstijging veroorzaakt ontleding van de kathode, heftige reacties tussen elektrolyt, anode en zuurstof, en resulteert in een ongecontroleerde verbranding of explosie.

²⁵ De SEI is een dunne, passieve laag die zich vormt op het oppervlak van de anode (meestal grafiet) tijdens het eerste laadproces. Deze laag ontstaat door de elektrochemische reacties tussen het elektrolyt en de anode (met name op het grafietoppervlak of ander actief materiaal). De SEI laag is halfdoorlatend: lithium-ionen kunnen er doorheen diffunderen, maar elektronen niet. Dit voorkomt verdere ongewilde reacties tussen het elektrolyt en de anode.

²⁶ Intercalatie is het proces waarbij lithium-ionen tijdens het opladen of ontladen van een lithium-ion batterij reversibel worden ingebracht tussen de lagen van het anodemateriaal (meestal grafiet) of het kathodemateriaal (zoals NMC).

Deze fasebeschrijving geeft aan dat lithiumcomponenten reeds in een eerdere fase betrokken raken bij het thermal runaway-proces. Na de SEI-laagontleding ontstaan directe reacties tussen het geïntercaleerde lithium en het elektrolyt. Deze reacties vinden plaats voor de ontleding van het kathodemateriaal en leiden tot krachtige exotherme reacties. Dit is de fase waarin brandbare gassen ontstaan (zoals CH_4 en C_2H_6). NMC kathodemateriaal ontleeft bij hogere temperaturen en ook later in het thermal runaway proces. Daarnaast speelt dat bij een volledig geladen batterij meer lithium in de anode aanwezig is dan bij een ontladen batterij. Hierdoor is er veel lithium beschikbaar voor de vroege reacties met het elektrolyt.

Bovenstaande theorie is van toepassing op individuele batterijcellen. Bij de situatie van de brandexperimenten bevinden zich meerdere batterijmodules in een batterijbehuizing. Het is niet duidelijk in welke mate en op welk moment temperatuurverhoging in de batterijbehuizing andere li-ion-batterijcellen in fasen brengt waarbij lithium emissies mogelijk worden.

Op basis van deze informatie kan verwacht worden dat lithium eerder vrijkomt dan NMC kathodemateriaal. Omdat de fasen elkaar echter zeer snel kunnen opvolgen, is het de vraag of dit in de praktijk een significant verschil zal geven en volledig kan verklaren waarom verhoogde lithiumgehalten bij aanvang van de brand zijn waargenomen. Alleen vanuit deze theorie kunnen verhoogde lithiumconcentraties bij begin van de brand niet volledig onderbouwd worden.

8.2.3

Verskil in deeltjesgrootte en samenstelling rookdeeltjes

Zhang et al. 2019 [6] beschrijven dat bij NMC li-ion-branden veel deeltjes vrijkomen. Hiervan bevatten vooral deeltjes van 2 µm en kleiner een relatief hoog gehalte met elementen die uit het NMC kathodemateriaal komen. Teresa L. Barone et al. 2021 [18] focusten zich op nog kleinere deeltjes en onderzochten de deeltjesmorfologie van aerosol van verbrande li-ion-batterijen met NMC, LTO en LFP kathode. Deeltjes uit de NMC en LTO kathode bestonden uit grotere deeltjes dan de LFP kathode. De NMC-aerosol waren talrijker en omvatten een breder scala aan afmetingen dan de aerosolemissies van andere batterijen.

Preisler et al. 2025 [20]²⁷ onderzochten de samenstelling van aerosol dat vrijkwam bij NMC batterijen. Elementanalyse toonde aan dat kleinere deeltjes ($<0,5 \mu\text{m}$) rijk waren aan de alkalimetalen lithium en natrium, terwijl grotere deeltjes ($>1 \mu\text{m}$) beduidend hogere concentraties nikkel en kobalt bevatten. Daarnaast toont de massaverdeling dat bij deze testen meer dan de helft van de massa afkomstig is uit deeltjes kleiner dan 1000 nm.

Bij de verspreiding van deeltjes zullen relatief grotere en zwaardere deeltjes doorgaans dichter bij de brand neerdalen. Aangezien nikkel en kobalt voornamelijk in grotere deeltjes vrijkomen, zullen deze elementen bij branden met NMC-batterijen in depositie dicht bij de brand in hogere verhoudingen ten opzichte van lithium aanwezig zijn.

²⁷ Report prepared, not peer reviewed

Kleinere deeltjes met lithium worden, onder invloed van voldoende wind en pluimstijging, over het algemeen over een grotere afstand verspreid.

Tot slot laten de deeltjes analyses van Preisler et al. [20] ook zien dat de verhouding van de NMC elementen per deeltje kunnen variëren. Deze verschillen in samenstelling zijn ook terug te vinden in rookstof, depositie en bluswatermetingen. Zo is bijvoorbeeld het mangaangehalte in depositie beduidend lager dan de verhouding die je bij een NMC622 li-ion-batterij zou verwachten. Ditzelfde is zichtbaar bij de metingen van Preisler et al. Bij het onderzoek van Preisler et al. is een NMC 18650 LGDBHG21865 batterij gebruikt. Op basis van de door de auteurs van dit RIVM-rapport verzamelde informatie betreft dit vermoedelijk een NMC622 li-ion-batterij.

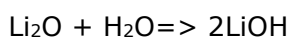
8.2.4 *Conclusie verschillen samenstelling rookstof en depositie*

Verhoogde lithiumconcentraties bij aanvang van de brand kunnen vrijwel alleen worden verklaard door een relatieve overmaat van lithium in de rook tijdens de beginfase van de brand, maar dit mechanisme kan met de door de auteurs geraadpleegde literatuur nog niet volledig worden verklaard. Wel is duidelijk dat lithium in kleinere nanodeeltjes voorkomt en dat dit in massaprocenten van de vrijgekomen deeltjes ook een significante hoeveelheid kan zijn. Dit zou ook kunnen wijzen op het feit dat hele kleine deeltjes eerder vrijkomen dan grotere deeltjes.

De literatuur ondersteunt de deeltjesgrootte verklaring en toont ook dat samenstelling van kathodemateriaal kan veranderen. Kenmerkend is dat Preisler et al. ook lagere hoeveelheden mangaan in het rookstof aantreft dan wat vanuit de originele batterij verwacht zou worden.

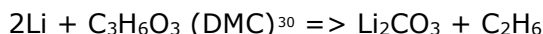
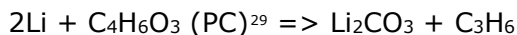
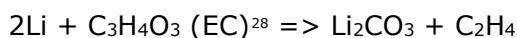
8.3 **Samenstelling geëmitteerd lithium en kathodemateriaal**

In de depositie (en ook bluswater) van li-ion-branden is vaak een verhoging van pH waarneembaar. De stijging van de pH-waarde in depositie kan worden verklaard door de vorming van lithiumhydroxide (LiOH) en lithiumoxide (Li₂O) tijdens een batterijbrand. Wanneer lithiumoxide in contact komt met water, reageert het direct tot lithiumhydroxide:



Aangezien water vaak aanwezig is tijdens een brand, bijvoorbeeld als verbrandingsproduct van koolwaterstoffen of via (verdampt) bluswater, dragen over het algemeen zowel lithiumoxide als lithiumhydroxide bij aan de stijging van de pH.

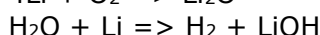
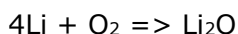
Verhoogde lithiumgehalten kunnen een indicatie zijn dat de pH verhoogd is. Het is echter zeer relevant om mee te wegen dat er ook andere lithiumverbindingen kunnen ontstaan of vrijkomen. Diverse onderzoeken [5], [16], [19] beschrijven het vrijkomen van lithiumcarbonaat (Li₂CO₃) op het moment dat tijdens een thermal runaway de SEI ontleeft. Daarbij reageert lithium met organische oplosmiddelen (alkylcarbonaten) uit het elektrolyt tot lithiumcarbonaat. Afhankelijk van de toegepaste oplosmiddelen worden de volgende reacties beschreven:



Daarnaast bevat de SEI stabiele lithiumverbindingen LiF, Li₂CO₃ en metastabiele verbindingen zoals ROCO₂Li, CH₂OCO₂Li, en ROLi [16]. Ook in het elektrolyt kunnen lithiumzouten aanwezig zijn zoals bijvoorbeeld LiPF₆ [2].

Om deze redenen zal niet al het vrijgekomen lithium uiteindelijk Li₂O of LiOH vormen. Lithiumcarbonaat is een zwakke base terwijl lithiumhydroxide een sterke base is. Hoewel lithiumcarbonaat bij dissociatie ook hydroxide-ionen (OH⁻) kan vrijgeven, draagt het significant minder bij aan de pH-stijging dan lithiumhydroxide. Onder invloed van fluorhoudende stoffen, zoals fluorwaterstof (HF) die tijdens de brand kan ontstaan, kunnen lithiumverbindingen zoals lithiumhydroxide tevens omgezet worden in lithiumfluoride (LiF), waardoor de samenstelling van de rook verandert.

Door veroudering, opladen bij te lage temperaturen of te snel laden van li-ion-batterijen kan lithium plating optreden [22]. Lithium plating is de vorming van metallisch lithium (Li) op de anode van de lithium-ion-batterij. Dit lithium wordt onttrokken uit de voorraad actieve lithium ionen (Li⁺) van de batterij. Lithium plating gaat over het algemeen gepaard met capaciteitsverlies van de batterij. Metallisch lithium kan in contact met water of zuurstof bijdragen aan het vrijkomen van lithiumoxide (Li₂O) en lithiumhydroxide (LiOH).



Het complex van onder andere bovenstaande processen maakt dat de hoeveelheden lithium en andere stoffen die in depositie of bluswater worden aangetroffen, niet direct te vertalen zijn naar een gelijke hoeveelheid hydroxiden in de omgeving en de daarmee potentieel toegenomen pH-waarde. Toch laten metingen zien dat hoge pH-waarden vaak samenhangen met hoge concentraties lithium[8].

Bij depositie van NMC-batterijen worden doorgaans ook verhoogde concentraties nikkel, mangaan en kobalt aangetroffen op locaties waar veel lithium aanwezig is. Dit patroon is ook bij de metingen in dit rapport het sterkst zichtbaar bij hogere pH-waarden. Daarom kan over het algemeen gesteld worden dat bij een brand met NMC-batterijen hogere pH-waarden vaker gepaard gaan met hogere concentraties van lithium, nikkel, mangaan en kobalt in de depositie.

De hoge temperaturen tijdens de verbranding kunnen ervoor zorgen dat het kathodemateriaal NiMnCoO₂ uiteenvalt [16], waardoor mogelijk eenvoudigere metaaloxiden zoals nikkeloxide(NiO), mangaanoxide

²⁸ Ethyleencarbonaat

²⁹ Propyleencarbonaat

³⁰ Dimethylcarbonaat

(MnO₂) en kobalt(III)oxide (Co₂O₃) kunnen worden gevormd. Het is onzeker in welke mate deze metalenoxiden worden gevormd, maar het zou een verklaring kunnen zijn waarom nikkel, mangaan en kobalt verhoudingen in bluswater, depositie en rook variëren vergeleken met wat in de NMC kathode aanwezig is. Deze variatie in samenstelling is ook terug te vinden in onderzoeken naar samenstelling van deeltjes uit de li-ion-batterijbrand [18],[20].

9 Analyse en discussie bluswater

9.1 Algemeen

In hoofdstuk [7] is beschreven dat de bluswatermonsters een significante toename van lithium, nikkel, mangaan en kobalt laten zien na het gebruik van het UHD-systeem. In dit hoofdstuk wordt uiteengezet welke factoren een mogelijke rol spelen bij de hoeveelheid schadelijke metalen van bluswateremissies. Ook worden schattingen gemaakt van de hoeveelheden vrijgekomen stoffen en worden de meetresultaten vergeleken met andere bluswater onderzoeken.

9.2 Emissies lithium, nikkel, mangaan, kobalt en deeltjesgrootte-verdeling

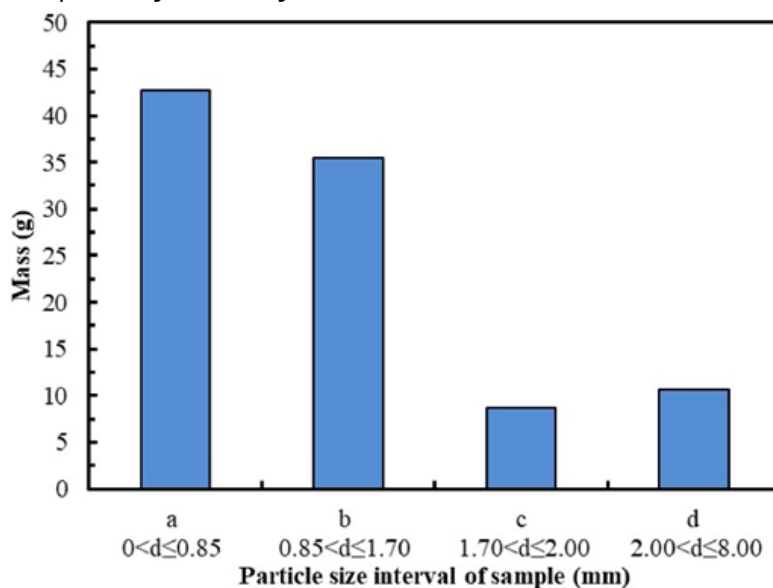
Tijdens dit experiment kwamen, naast verbrandingsgassen, ook grote hoeveelheden deeltjes vrij. Na het gebruik van het UHD-systeem werden in het bluswater hogere concentraties gemeten in vergelijking met luchtmetingen en depositie. Opvallend was dat er in de bluswatermonsters veel zichtbaar zwart gruis als sediment aanwezig was.

Het vrijkomen van grote hoeveelheden deeltjes en gruis uit li-ion-batterijen is ook eerder aangetroffen bij experimenten die het RIVM met NMC batterijen heeft uitgevoerd, zie RIVM 2021-0019 [8]. Deze experimenten zijn echter ongeschikt voor kwantificering van de hoeveelheden. Er zijn twee onderzoeken gevonden die specifiek onderzoek hebben gedaan naar hoeveelheden emissies van deeltjes, deeltjesgrootteverdeling en deeltjessamenstelling bij NMC li-ion-branden. Met behulp van deze experimenten kan een schatting gemaakt worden van de deeltjes emissies die in de omgeving en het bluswater terechtkomen.

Uit experimenten met thermal runaway van NMC lithium-ion-batterijen blijkt dat er veel kleine deeltjes vrijkomen, zoals aangetoond door Chen et al. 2020 [5]. De meeste van deze deeltjes hebben afmetingen van 8-300 μm waarvan 90% kleiner is dan 240 μm .

Zhang et al. 2019 [6] voerden een vergelijkbaar onderzoek uit waarbij ze 100% geladen NMC622 batterijen in thermal runaway brachten. Tijdens dit experiment werd 97,47 gram aan deeltjes opgevangen, wat overeenkomt met 11,20 massaprocent van de oorspronkelijke batterij. In vergelijking met Chen et al. 2020 [5] kwamen meer grotere deeltjes vrij, ongeveer de helft was groter dan 850 μm .

Figuur 14 De deeltjesgrootteverdeling volgens Zhang et al. 2019 [6]. De massaverhouding per deeltjesgrootte is als volgt: deeltjes van 0 tot 0,85 mm vormen 43,79%, deeltjes van 0,85 tot 1,70 mm 36,37%, deeltjes van 1,70 tot 2,00 mm 8,88%, en deeltjes van 2,00 tot 8,00 mm 10,96%. Alle deeltjes samen wegen 97,47 g en vertegenwoordigen 11,20 massaprocent van de oorspronkelijke batterij.



Vervolgens zijn door Zhang et al. 2019 [6] de deeltjesgrootteverdeling en de samenstelling per deeltjesgrootte bepaald. Hieruit blijkt o.a. dat deeltjes groter dan 2 mm over het algemeen een andere samenstelling hebben dan deeltjes kleiner dan 2 mm.

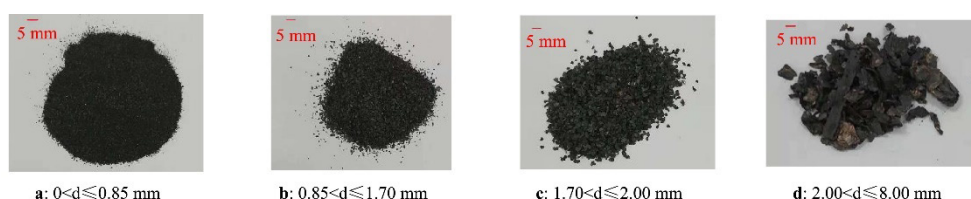
Figuur 15 Een selectie uit het overzicht van elementaire massa en massapercentage in elk monster uit Zhang et al. van de deeltjesgrootteverdeling en samenstelling daarvan. De selectie is zo gekozen dat de elementen nikkel, mangaan, kobalt en lithium zichtbaar zijn.

Table 2. Elemental mass and its mass percentage in each sample.

	Overall $0 < d \leq 8.00$		<i>a</i> $0 < d \leq 0.85$		<i>b</i> $0.85 < d \leq 1.70$		<i>c</i> $1.70 < d \leq 2.00$		<i>d</i> $2.00 < d \leq 8.00$	
Ele.	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
C	29.441	30.206	12.838	30.080	10.458	29.500	1.425	16.470	4.719	44.180
Ni	16.754	17.189	7.736	18.126	6.808	19.202	1.913	22.098	0.298	2.785
Cu	5.428	7.076	2.521	5.745	2.189	4.626	0.620	4.711	0.098	22.444
Co	4.819	5.569	2.239	5.907	1.947	6.175	0.547	7.162	0.086	0.914
Mn	2.976	4.944	1.239	5.245	1.312	5.492	0.315	6.325	0.110	0.805
Al	6.897	4.005	2.452	3.629	1.640	5.169	0.408	4.702	2.397	1.075
Li	3.903	3.053	1.549	2.903	1.833	3.699	0.407	3.638	0.115	1.031

In een overzicht van de deeltjesgrootte is zichtbaar dat bij deeltjes kleiner dan 2 mm 16,5 tot 30,1 massa% uit koolstof bestond, 17,1 tot 22,1 massa% uit nikkel, 5,6 tot 7,2 massa% uit kobalt, 4,9 tot 6,3 massa% uit mangaan en 2,9 tot 3,7 massa% uit lithium. Grotere deeltjes met afmetingen van 2 tot 8 mm bevatten in verhouding beduidend minder lithium, nikkel, mangaan en kobalt en meer koper (22,4 massa%) en koolstof (44,2 massa%). Dit wijst erop dat kleinere deeltjes in verhouding meer NMC kathodemateriaal bevatten.

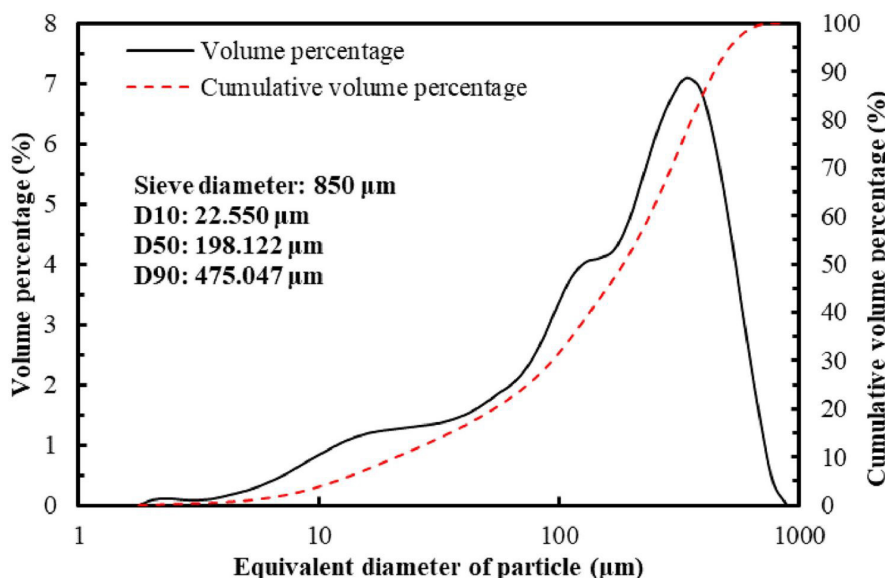
Figuur 16 Visuele weergave van de deeltjesgrootteverdeling uit Zhang et al. (2019). Deze deeltjes zijn ook in overvloed aanwezig en zichtbaar in het sediment van het bluswater na gebruik van het UHD-systeem.



De aanwezigheid van veel kleine deeltjes kan mogelijk worden verklaard door de hoge temperaturen die in de batterij bereikt worden en de drukopbouw die in de batterijcel plaatsvindt bij een thermal runaway. Chen et al. 2020 [5] beschrijft temperaturen hoger dan 1083 °C. Lithium-nikkel-mangaan-kobaltoxide (NMC) kathodemateriaal is een complex oxide³¹ dat keramische eigenschappen heeft en over het algemeen bros materiaal is. Hierdoor heeft het materiaal eerder de neiging om te breken of te barsten onder mechanische spanning of impact, in plaats van te vervormen zoals metalen dat doen. Tijdens een thermal runaway kan er drukopbouw in de batterij optreden, waardoor het kathodemateriaal aan aanzienlijke krachten wordt blootgesteld en in kleine deeltjes uiteen kan vallen. Onder andere Peng et al. 2025 [7] en Larsson et al. 2017 [2] beschrijven dat een afname in het ladingspercentage van li-ion-batterijen de impact van het afblazen van de overdruk gassen op thermische propagatie verminderen. Met andere woorden, volledig geladen batterijen vertonen heftigere pieken in warmteafgifte met intense vlammen, wat wijst op een grotere impact van gassen die vrijkomen tijdens een thermal runaway. Deze impact kan resulteren in een snellere brandpropagatie en mogelijk ook tot het ontstaan van meer kleine deeltjes uit het kathodemateriaal.

³¹ Een complex oxide is een chemische verbinding die zuurstof en ten minste twee andere elementen bevat (of zuurstof en slechts één ander element dat zich in minstens twee oxidatietoestanden bevindt).

Figuur 17 Deeltjesgrootteverdeling uit Zhang et al. Uit de figuur blijkt dat bij dit onderzoek 10% van het totale volume van de deeltjes een equivalente deeltjesdiameter heeft die kleiner is dan 22.550 μm .



De hoge meetwaarden na de inzet van het UHD-systeem kunnen mogelijk deels worden verklaard doordat grotere deeltjes zwaarder zijn. Hierdoor bewegen ze minder snel met de rook mee en blijven ze, in vergelijking met kleinere deeltjes, in grotere mate achter in de batterijbehuizing. Uit de deeltjesgrootteverdeling hebben Zhang et al. 2019 [6] een overzicht gemaakt van het volumepercentage van de deeltjes, zie [Figuur 17]. Hieruit blijkt dat 10% van het totale volume van de deeltjes een equivalente deeltjesdiameter heeft die kleiner is dan 22,550 μm . Met andere woorden, 90% van het volume van de deeltjes heeft een grotere diameter dan 22,550 μm . Een groter volume betekent een grotere massa waardoor dit zich eerder afzet als depositie. Wanneer grotere deeltjes grotendeels in de batterijbehuizing achterblijven, komen deze bij een normale brand niet in grote hoeveelheden vrij. Wanneer echter met een UHD-systeem in de batterijbehuizing wordt gespoten, kunnen deze deeltjes uit de batterijbehuizing worden gespoeld. Dit proces kan bijdragen aan de sterke toename van zware metaaldeeltjes na de inzet van het UHD-systeem. Wanneer een batterij volledig geladen is, zullen er naar verwachting meer kleine deeltjes ontstaan, omdat een thermal runaway bij een geladen batterij tot snellere gasontwikkeling leidt en daarmee potentieel grotere drukopbouw in de batterijcel. Hierdoor heeft het ladingspercentage mogelijk invloed op de mate van vervuiling bij de inzet met een UHD-systeem. Het batterijtype kan hier naar verwachting ook een rol in spelen omdat het verloop van een thermal runaway per batterijtype kan verschillen.

9.3 Vergelijking bluswaterconcentraties NMC batterijen

In vergelijking met andere onderzoeken naar bluswater bij NMC batterijbranden zijn de gemeten hoeveelheden nikkel en kobalt bij experiment 2 relatief hoog. Dit geldt vooral voor de meetwaarden van de monsters na de inzet van het UHD-systeem. Ter vergelijking is in [Tabel 16] een selectie van meetwaarden van bluswater van NMC batterij branden van drie onderzoeken weergegeven, te weten: RISE 2023:22 [3], Bordes et al. 2024 [4] en RIVM 2021-0019 [8].

De meetwaarden uit deze tabel kunnen niet een-op-een met elkaar vergeleken worden omdat o.a. de batterijcapaciteit, de blusmethode en de wijze waarop de batterijen zijn blootgesteld aan het bluswater onderling verschillen. Daarnaast verschilt de monsterbewerking per onderzoek. Bij RISE 2023:22 [3] en RIVM 2021-0019 [8] is het bluswater gefilterd terwijl bij Bordes et al. 2024 [4] gekozen is niet te filteren, waardoor niet opgeloste deeltjes ook zijn meegenomen in de analyse. De methode en de resultaten van Bordes et al. [4] passen redelijk bij de meetwaarden van het ongefilterd bluswater van experiment 2. Het is aannemelijk dat ook bij dit onderzoek de monsternamewijze de meetresultaten beïnvloedt.

Op hoofdlijnen zijn er een aantal verschillen te noemen tussen de drie onderzoeken:

- Bij het onderzoek van het RIVM 2021-0019 [8] zijn uitgebrande NMC batterijen na verbranding in een bak met water gelegd, waardoor deeltjes die vrijkwamen tijdens de brand niet meegenomen zijn in de analyse.
- RISE 2023:22 [3] bracht een elektrisch voertuig met een 50 kWh NMC batterij in thermal runaway en vervolgens alleen een gedemonteerde 50 kWh NMC batterij, zonder de rest van het voertuig. De gedemonteerde batterij werd afgeschermd tegen direct bluswatercontact om gelijke omstandigheden na te bootsen met de elektrische voertuigbrand met de batterij er nog in. Beide branden werden met een sprinklerinstallatie geblust.
- Bordes et al. 2024 [4] brachten drie losse NMC modules in thermal runaway waarbij water direct over de batterijcellen vloeyde.

*Tabel 16 Selectie van meetwaarden van bluswater uit verschillende onderzoeken. De lithium concentratie met een * van test 1 is (vanwege een aangenomen typefout in dat rapport) afgeleid uit een andere tabel van hetzelfde rapport. RISE 2023:22 0-30 min toont de meetwaarden van het bluswater van de eerste 30 minuten van het onderzoek. RIVM toont concentraties nadat de batterijen 1,5 uur in een zeer geringe hoeveelheid water zijn gekoeld (150 ml).*

	RISE 2023:22 0-30 min		Bordes et al. 2024 Geëxtrapoleerd			RIVM 2021-0019	
	BEV 50kWh (mg/L)	Battery 50kWh (mg/L)	Test 1 500Wh (mg/L)	Test 2 500Wh (mg/L)	Test 3 900Wh (mg/L)	Test 1 21 Wh (mg/L)	Test 2 42 Wh (mg/L)
Li	4,1	32	5*	5,2	5,9	1214,0	676,0
Mn	0,14	0,11	0,1	3,4	0,5	0,0	0,1
Ni	0,08	0,05	0,4	9,8	3,3	0,2	0,6
Co	0,03	0,02	0,5	2,6	0,6	0,1	0,2

Bij het onderzoek van RIVM 2021-0019 [8] was het kenmerkend dat de pH-waarde (en dus de lithiumconcentratie) na verloop van tijd opliep en dat vooral hoge waarden gemeten zijn bij het monster waarbij een batterij door de explosie geheel open is gescheurd, zie [Tabel 16] kolom batterij met 21 Wh. Nikkel, mangaan en kobalt verbindingen lossen slecht op waardoor de concentraties van deze stoffen beduidend lager zijn dan de goed-oplosbare lithium ionen.

RISE 2023:22 [3] toont in bijlage 5 en 6 een gelijksoortig beeld waarbij meetwaarden van een later stadium van de test (aan het eind van de test) in verhouding hogere lithium gehalten tonen en lagere concentraties mangaan, nikkel en kobalt.

In het onderzoek van Bordes et al. 2024 [4] zijn kleine batterijmodules direct blootgesteld aan sprinkler water, terwijl bij RISE 2023:22 [3] het batterijpakket beschermd werd tegen direct watercontact. In het onderzoek van Bordes toont test 2 de grootste hoeveelheid slecht-oplosbare metalen. Foto's van het onderzoek tonen dat bij deze test soms de batterijmodule zichtbaar beschadigd en verschoven is, mogelijk als gevolg van fysieke krachten door kleine explosies. Door de blusmethode zullen zeer kleine deeltjes bij Bordes et al. 2024 [4] mogelijk sneller meespoelen in het opgevangen bluswater dan bij de methode van RISE 2023:22 [3]. Bij RIVM 2021-0019 [8] zijn de bij de brand vrijgekomen deeltjes niet - of beperkt - meegenomen in de bemonstering.

De hoogste meetwaarden van Bordes et al. 2024 [4] (nikkel: 9,8 mg/L, kobalt: 2,6 mg/L) zijn qua orde grootte gelijk aan de meetwaarden voor inzet van het UHD-systeem bij experiment 2 (nikkel: 13,3 mg/L, kobalt: 2,3 mg/L). De meetwaarden na inzet van het UHD-systeem tonen significant hogere concentraties dan zichtbaar in [Tabel 16]. Dit geldt zowel voor slecht als goed-oplosbare stoffen. Dit is een aanwijzing dat de oorzaak niet voortkomt uit de wijze van monsternamen maar uit de emissie door de inzet van het UHD-systeem.

De toename van het gehalte aan metalen na de inzet van het UHD-systeem kan worden verklaard door de hoge druk waarmee het systeem werkt (300 bar). Door deze druk spoelen losse deeltjes uit de batterijen. Hoewel de kracht van het water in de batterijbehuizing snel af zal nemen, is de verwachting dat UHD-bluswater met relatief veel kracht door de batterijbehuizing kan stromen. Oplosbare stoffen zoals lithiumhydroxide zullen sneller oplossen door krachtige waterstromen in de batterijbehuizing. Kleine deeltjes die zich nog in de batterijbehuizing van de elektrische auto bevinden, kunnen door het spoelen van bluswater in de omgeving terecht komen. Blusmethoden zoals onderdompelen van een uitgebrande elektrische auto zullen een minder krachtige spoelwerking veroorzaken en bovendien is het verontreinigde bluswater gecontroleerd aanwezig in de dompelcontainer.

De hoeveelheid deeltjes die vrijkomt, hangt onder andere samen met de mate van brandverspreiding in het batterijpakket en het laadniveau van de batterij. Hoe hoger het laadniveau, des te intenser en krachtiger de ontbranding, drukopbouw en explosie in de batterijen kunnen zijn, wat leidt tot de vorming van meer kleine deeltjes. Wanneer (onbeschadigde)

batterijcellen nog niet bij de brand betrokken zijn, zal het uitspoelen van kleine deeltjes naar verwachting geen rol spelen wanneer het UHD-systeem zonder abrasieve deeltjes wordt ingezet. Bij het snijden met abrasief zullen een zeer gering aantal batterijcellen beschadigd raken.

Wanneer een UHD-systeem een brand in een batterijmodule zodanig kan blussen dat de brandpropagatie stopt, waardoor een aanzienlijk deel van de batterij niet bij de brand betrokken raakt, dan kan een UHD-systeem ook bijdragen in het verminderen van het ontstaan van deeltjes met zware metalen. Dit is echter alleen mogelijk als de blussing plaatsvindt terwijl de brandverspreiding in de batterijbehuizing nog beperkt is tot een lokaal deel van de gehele batterij. Het is onduidelijk hoe vaak dit scenario zich voordoet.

9.4 Schatting theoretische hoeveelheid vrijgekomen deeltjes

Voor een schatting van de hoeveelheid vrijgekomen deeltjes is de kathodesamenstelling relevant. Zo is er bijvoorbeeld in een NMC622 batterij tweemaal zoveel kobalt en mangaan aanwezig in vergelijking met een NMC611 batterij, terwijl de hoeveelheden nikkel in beide batterijtypen gelijk is. In het elektrische voertuig van dit experiment is een NMC622 batterij toegepast.

Wanneer wordt aangenomen dat de deeltjeshoeveelheid, de deeltjes-samenstelling en de deeltjesgrootteverdeling bij het onderzoek met NMC622 batterijen van Zhang et al. 2019 [6] representatief zijn voor iedere NMC622 batterij die in thermal runaway raakt, kan met deze gegevens een schatting worden gemaakt van de maximale hoeveelheid deeltjes die bij een 75 kWh EV met een NMC622 batterij kan ontstaan.

Battery university^{32 33} [23] geeft voor NMC batterijen een specifieke energie van 150-220 Wh/kg NMC batterij. Bij het hanteren van het gemiddelde van 185 Wh/kg bedraagt de massa van een 75 kWh NMC-batterij ongeveer 405 kg.

$$\text{Massa batterij (kg)} = \frac{\text{Batterijcapaciteit (Wh)}}{\text{Energie per kg batterij} \left(\frac{\text{Wh}}{\text{kg}} \right)} = \frac{75.000}{185} = 405 \text{ kg}$$

Bij een worst-case benadering van een gemiddelde li-ion-batterij, waarbij wordt aangenomen dat de volledige batterij van 405 kg volledig in thermal runaway raakt en de meetresultaten van Zhang et al. 2019 [6] van toepassing zijn, komt $405 \cdot 11,2 \text{ massa\%} = 45,4 \text{ kg}$ aan deeltjes kleiner dan 8 mm vrij, zie paragraaf [9.2].

Op basis van de in Zhang et al. 2019 [6] en in [Figuur 14] beschreven massaverdeling voor de samenstelling van alle deeltjes kleiner dan 8 mm kunnen deze percentages worden geëxtrapoleerd voor een brand waarbij 45,4 kg deeltjes vrijkomen. Van deze 45,4 kg is iets meer dan 30,7 massaprocent afkomstig uit nikkel, mangaan, kobalt en lithium. Deze massapercentages en de geëxtrapoleerde hoeveelheden voor een

³² <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>

³³ <https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries>

NMC611-batterij van 405 kg zijn weergegeven in onderstaande [Tabel 17].

Tabel 17 Massapercentages van NMC kathode-elementen uit deeltjes kleiner dan 8 mm uit Zhang et al. (kolom 2), geëxtrapoleerd naar een theoretische maximale emissie van 45,4 kg deeltjes bij een NMC622 batterij van 405 kg.

	Massa% overall bij $0 < d \leq 8,00$	Hoeveelheid deeltjes (kg) kleiner dan 8 mm bij NMC622 li-ion-batterij van 405 kg
Ni	17,189	7,80
Co	5,569	2,53
Mn	4,944	2,24
Li	3,053	1,39

De in [Tabel 17] beschreven hoeveelheden zijn gebaseerd op een experiment waarbij individuele batterijcellen onder ideale thermal runaway omstandigheden tot ontbranding zijn gebracht. Het is niet te verwachten dat bij een brand in een elektrische auto individuele batterijcellen even "effectief" deelnemen aan een brand als bij dit experiment van Zhang et al. De in [Tabel 17] beschreven hoeveelheden zijn daarom een worst case benadering en dienen ter orde grootte indicatie. De representativiteit van Zhang et al. voor iedere NMC batterij is mogelijk beperkt, de aanname van een volledige thermal runaway zal conservatief zijn voor praktijksituaties en de chemische samenstelling en ladingspercentage kunnen resultaten sterk beïnvloeden. De hoeveelheden in [Tabel 17] moeten dus met nuance geïnterpreteerd worden en dienen ter orde grootte indicatie van een in de praktijk weinig realistisch worst case scenario.

Bij een autobrand scenario geldt dat de batterijmodules zich in een batterijbehuizing bevinden. Bij een brand in het batterijpakket van het elektrische voertuig kan bij voldoende drukopbouw de batterijbehuizing gedeeltelijk openscheuren. Hierdoor zal een deel van de deeltjes met lithium, nikkel, mangaan en kobalt in de omgeving terecht komen (depositie of bluswater) en een deel zal achterblijven aan de binnenzijde van de batterijbehuizing.

De experimenten laten zien - en het is logisch dat wanneer een UHD-systeem op een batterijpakket wordt gebruikt dat al volledig in thermal runaway is geraakt - dat niet alleen de brand wordt geblust, maar ook deeltjes met lithium, nikkel, mangaan en kobalt uit de batterijbehuizing worden gespoeld. Het aanwezige lithium(hydroxide) lost goed op in water, terwijl slecht-oplosbare deeltjes nikkelmangaankobaltoxide (kathode) en grafiet (anode) of ontledingsproducten uit de batterij grotendeels door fysieke krachten van het bluswater uit de batterijbehuizing gespoeld worden. Het NMC kathodemateriaal en lithium(hydroxiden) vormen hierbij een beduidend relevanter milieu- en eventueel gezondheidsrisico dan het grafieten anodemateriaal. Bij experiment 2 was de aanwezigheid van deze deeltjes (zowel kathode als anodemateriaal) ook visueel herkenbaar als zwart sediment op de bodem.

9.5 Schatting emissies bluswater bij experiment 1 en 2

9.5.1 *Variabelen bij bluswateremissies*

Om een beeld te krijgen van de omvang van de potentiële milieubelasting en gezondheidsrisico's, is het belangrijk om inzicht te hebben in de totale bluswateremissie bij een UHD-blussing. Tegelijkertijd zijn er veel variabelen die de omvang van deze emissies kunnen beïnvloeden, zoals:

- Het deel van de batterij dat bij de brand betrokken is geraakt.
- De mate van beschadiging van individuele batterijcellen door de brand. Hierbij kan het laadniveau van de batterij een rol spelen. In een volledig geladen lithium-ion-batterij is meer energie opgeslagen, wat bij een thermal runaway kan leiden tot explosie van batterijcellen [7], [8].
- Het specifieke li-ion-batterijtype, zoals NMC of LFP (zie ook bijlage 5).
- De hoeveelheid en de druk van het water dat in de batterijbehuizing wordt gespoten en de noodzaak om weglekkend bluswater aan te blijven vullen. Hierbij kan de wijze waarop in de batterijbehuizing is gesneden een rol spelen. Als met het UHD-systeem te diep is gesneden, kan een gat in de bodem van de batterijbehuizing ontstaan. Hierdoor loopt bluswater uit de batterijbehuizing weg, wat moet worden aangevuld. Deze extra "spoeling" kan potentieel meer deeltjes meenemen met het UHD-bluswater. Wanneer er al andere openingen zijn waar het UHD-bluswater uit weg kan lopen (scheuren in batterijbehuizing of bezweken overdrukventielen), dan zal de wijze van UHD-snijmethode naar verwachting minder van invloed zijn.

9.5.2 *Schatting hoeveelheid vrijgekomen lithium bij experiment 2*

Omdat slecht-oplosbare stoffen niet homogeen zijn verdeeld in de afvalwatertank, is het niet mogelijk een volledig representatief watermonster te nemen van de gemiddelde gehalten nikkel-, mangaan- en kobaltverbindingen in de afvalwatertank. De verhoudingen van lithium, nikkel, mangaan en kobalt in de batterij zijn echter bekend. Wanneer de totale hoeveelheid lithium in de afvalwatertank bekend is, kan indicatief worden afgeleid hoeveel nikkel, mangaan en kobalt in de afvaltank aanwezig zal zijn.

In [Tabel 12] van paragraaf [7.3] zijn de lithiumconcentraties van 36 mg/L weergegeven van het gefilterde bluswater uit de tankwagen. Wanneer dit een representatief gemiddelde is voor de gehele tankinhoud, betekent dit dat de totale hoeveelheid vrijgekomen lithium in de tankwagen (10 m³ inhoud) 360 gram bedraagt. Deze hoeveelheid is afkomstig van het blussen van twee voertuigen. Bij de eerste auto was de batterij voor ongeveer de helft uitgebrand, terwijl de batterij van de tweede auto volledig was uitgebrand. Als wordt aangenomen dat de verdeling van lithium in het bluswater voor een derde afkomstig is van het eerste voertuig en voor twee derde van het tweede voertuig, kan worden geconcludeerd dat het vrijkomen van ongeveer 240 gram lithium in het bluswater bij een voertuigbrandbestrijding met lage druk en UHD een redelijk representatieve schatting is. Het spreekt voor zich dat deze schatting niet nauwkeurig is en in realiteit zowel hoger als lager kan zijn.

9.5.3

Aannames bij schatting van hoeveelheid kathodemetalen in bluswater

Schattingen van de totale emissies in het bluswater bij het gebruik van een UHD-systeem, zoals gebaseerd op de meetresultaten uit dit onderzoek, gaan gepaard met onzekerheden en geven een indicatief beeld. Voor dergelijke berekeningen zijn met de beperkte meetresultaten aannames nodig. De belangrijkste aannames worden hieronder (nogmaals) uiteengezet:

1. Bij de experimenten is al het bluswater afgevoerd naar de afvalwatertank en is er geen significante hoeveelheid lithium houdend bluswater verloren gegaan door lekkages in het afzuigsysteem. (In de praktijk is bluswater buiten de bluswateropvang gekomen).
2. Al het lithium in het bluswater in de afvalwatertank is volledig in oplossing. Voor experiment 2 wordt de (in deze paragraaf afgeleide) hoeveelheid vrijgekomen lithium (240 g) in het bluswater als correct beschouwd.
3. De metalen lithium, nikkel, mangaan en kobalt worden door blussing in gelijke hoeveelheden uit de batterijbehuizing gespoeld en de hoeveelheden lithium, nikkel, mangaan en kobalt in de afvaltank volgen dezelfde molverhoudingen als in de NMC622 batterij. Dit betekent een molverhouding van Li:Ni:Mn:Co= 1,0 : 0,6 : 0,2 : 0,2

9.5.4

Schatting emissie NMC kathodemateriaal op basis van molverhouding

De totale hoeveelheid vrijgekomen nikkel, mangaan en kobalt in bluswater kan worden geschat middels de molverhoudingen van de NMC622 batterij. Hierbij worden de hoeveelheden nikkel, mangaan en kobalt afgeleid van de lithiumhoeveelheden. Deze hoeveelheden zijn in onderstaande [Tabel 18] uitgewerkt voor zowel de geschatte hoeveelheid vrijgekomen metalen bij experiment 1 als experiment 2.

Tabel 18 Parameters voor het schatten van de massa's van NMC622 kathodematerialen aan de hand van de molverhouding

Element	Molverhouding in kathode	Mol-massa (g/mol)	Massa bij 1 mol lithium (g)	Massa-verhouding (%)	Hoeveelheid element (g) in bluswater bij exp. 1	Hoeveelheid element (g) in bluswater bij exp. 2
Li	1	6,94	6,94	10,69	120	240
Ni	0,6	58,69	35,21	54,24	609	1218
Mn	0,2	54,94	10,99	16,92	190	380
Co	0,2	58,93	11,79	18,15	204	408

De methodiek met geëxtrapoleerde hoeveelheden metalen uit [Tabel 18] wijst uit dat er bij 240 g lithium ongeveer 1218 g nikkel, 380 g mangaan en 408 g kobalt vrij is gekomen.

9.5.5

Schatting emissie NMC kathodemateriaal op basis van theoretische maximale emissie uit Tabel 18.

In [paragraaf 9.4] is op basis van het onderzoek van Zhang et al. 2019 [6] een berekening gemaakt van de massa lithium, nikkel, mangaan en kobalt die vrijkomt als fijne deeltjes (kleiner dan 8 mm) bij de volledige

verbranding van een 75 kWh NMC622-batterij zie [Tabel 17]. Hierbij wordt aangenomen dat een autobatterij, bestaande uit meerdere batterijmodules in een behuizing, proportioneel evenveel deeltjes afgeeft als een enkele batterijcel die in een testopstelling in thermal runaway is gebracht. In de praktijk zal de verbranding doorgaans minder compleet zijn, waardoor ook minder deeltjes vrijkomen.

Uit [Tabel 17] blijkt dat de theoretisch maximale hoeveelheid lithium van een NMC622 batterij 1390 g is. Een lithiumemissie van 240 g bij experiment 2 is ongeveer 17,3 % van dit theoretisch maximum terwijl 120 g van experiment 1 ongeveer 8,6% vormt van dit maximum. Wanneer de NMC kathodematerialen van Zhang et al. 2019 [6] worden vertaald met deze percentages, dan ontstaat het onderstaande overzicht [Tabel 19].

Tabel 19 Overzicht van worst case berekening van vrijgekomen deeltjes uit een NMC622 batterij uit het onderzoek van Zhang et al. Waarmee middels extrapolatie van de hoeveelheden lithium, de hoeveelheden nikkel, mangaan en kobalt kunnen worden geschat voor experiment 1 en 2.

Element	Worst case benadering vrijgekomen massa (g)	Geëxtrapoleerde hoeveelheden metalen in bluswater (g) bij experiment 1 (120 g lithium)	Geëxtrapoleerde hoeveelheden metalen in bluswater (g) bij experiment 2 (240 g lithium)
Li	1390	120	240
Ni	7800	673	1347
Mn	2240	193	387
Co	2530	218	437

9.5.6 Conclusie schatting emissies bluswater

De resultaten van beide methoden uit [Tabel 18] en [Tabel 19] vertonen relatief geringe spreiding (maximaal 11%). Dit betekent dat de theoretische benadering van molverhoudingen goed aansluiten bij testresultaten op kleine schaal van Zhang et al. 2019 [6]. Met andere woorden, de deeltjes die bij de testopstelling van Zhang et al. vrijkomen, hebben op hoofdlijnen nog dezelfde samenstelling in vergelijking met het moment dat ze nog in de batterij aanwezig waren. Dit onderschrijft de in paragraaf [9.5.3] genoemde aanname nr. 3 om de hoeveelheid kathodematerialen te kunnen schatten.

Barone et al. 2021 [18] en Preisler et al. 2025 [20] toonden dat vooral heel kleine deeltjes (nanometer bereik) een andere samenstelling toonden dan de batterijchemie. De samenstelling van grotere deeltjes lijkt in deze onderzoeken meer overeenkomsten te tonen dat past bij de samenstelling van het kathodemateriaal.

Bij een volledig bij de brand betrokken geraakte batterij van experiment 2 tonen beide methoden een emissie van het element nikkel tussen 1218 en 1347 gram, mangaan tussen de 380 en 387 gram en kobalt tussen 408 en 437 gram.

Hoewel de berekeningen van emissies slechts een geringe spreiding vertonen, kunnen andere variabelen, zoals het type batterij en de brandontwikkeling, een aanzienlijk grotere invloed hebben op het uiteindelijke resultaat. De weergegeven hoeveelheden zijn schattingen binnen een orde van grootte; het kwantificeren van de onzekerheid in deze emissies wordt daarom als weinig zinvol beschouwd. Om consistentie te waarborgen, wordt in dit rapport voor situaties waarin een batterij volledig door brand is beschadigd gewerkt met afgeronde gemiddelde waarden van 240 g lithium, 1300 g nikkel en 420 g kobalt. Vanwege de minder kritische milieurisico's van mangaan wordt dit element in de verdere berekeningen buiten beschouwing gelaten.

Uit deze paragraaf en [Tabel 17] blijkt dat ongeveer 17% van het maximaal aantal deeltjes (worst case benadering) is vrijgekomen. Dit suggereert dat bij een langduriger of meer intense batterijbrand, waarbij meer cellen heviger beschadigd raken en de UHD-blussing later wordt toegepast, de bluswateremissies hoger zouden kunnen zijn dan nu gemeten. Een emissie die in de buurt komt van het worstcasescenario (100% van het theoretisch maximum uit [Tabel 17]) lijkt in de praktijk echter onwaarschijnlijk.

9.5.7 *Schatting hoeveelheid anionen bij experiment 1 en 2*

De gemeten anionen zijn, net als de gemeten lithiumionen, goed oplosbaar in water. Door voor de totale hoeveelheid anionen dezelfde lijn te volgen als bij lithium, kunnen totale hoeveelheden geschat worden. Hierbij wordt dezelfde verdeling tussen experiment 1 en 2 gehanteerd als bij lithium.

In de tankwagen bedraagt de gemeten concentratie fluoride 29,3 mg/L. Bij 10 m³ afvalwater is er dan in totaal 293 g fluoride aanwezig. Bij afronding naar 300 g fluoride en een verdeling van 1/3^e voor experiment 1 en 2/3^e voor experiment 2, is bij experiment 1 ongeveer 100 g fluoride en bij experiment 2 ongeveer 200 g fluoride in het bluswater vrijgekomen.

9.6 **Verhouding bluswateremissies tot bodemnormen**

In deze paragraaf worden de eerder berekende emissies beoordeeld aan de hand van verschillende bodemnormen³⁴ om een beeld te krijgen van de impact van de emissie.

9.6.1 *Achtergrondinformatie over bodemnormen*

In de onderstaande [Tabel 20] is een selectie van bodemnormen opgenomen. Nikkel en kobalt zijn de belangrijkste kathodemetalen die kunnen bijdragen aan een overschrijding van deze normen. Daarom is gekozen voor deze selectie. Voor lithium zijn geen bodemnormen beschikbaar.

De normen voor wonen en landbouw zijn vastgesteld om te voorkomen dat grond die de norm overschrijdt, wordt verplaatst en vermengd met grond die binnen de norm valt. De interventiewaarde is een grens waarboven sanering noodzakelijk is in bestaande situaties. Met andere woorden; de kwaliteitseisen zijn preventief van aard om hergebruik van

³⁴ De betrokken normen zijn onder andere te vinden op <https://rvs.rivm.nl/onderwerpen/normen>

grond mogelijk te maken terwijl de interventiewaarden curatief van aard zijn voor bestaande bodemvervuiling.

Toelichting bodemnormen

De interventiewaarde geldt in strikte zin alleen voor verontreinigingen die voor 1987 zijn ontstaan. Omdat de interventiewaarde echter een goede risico-onderbouwing kent kan deze ook ter indicatie voor eventuele ongewenste effecten worden gebruikt, zoals in deze rapportage. Voorts is er binnen de circulaire bodemsanering vastgesteld dat er sprake is van een ernstig geval van bodemverontreiniging indien voor ten minste één stof het gemiddelde gemeten concentratie van minimaal 25 m³ bodemvolume in het geval van bodemverontreiniging, hoger is dan de interventiewaarde (Circulaire bodemsanering 2013).

Voor verontreinigingen die zijn ontstaan na 1987 geldt de zorgplicht zoals omschreven in de omgevingswet. De zorgplicht verplicht iedereen bij (dreigende) bodemverontreiniging maatregelen te nemen die redelijkerwijs mogelijk zijn. Hiermee moeten nieuwe verontreinigingen of aantastingen van de bodem worden voorkomen of beperkt en moeten reeds ontstane verontreinigingen of aantastingen ongedaan worden gemaakt.

Om de impact van overschrijding van bodemnormen door het blussen van een elektrische auto met UHD-systeem op hoofdlijnen te vergelijken met de impact van overschrijding van bodemnormen door het blussen van een traditionele auto met brandstofmotor, wordt ook gekeken naar bodemnormen voor minerale olie. Bij een brand in een auto met brandstofmotor kan onverbrande motorolie en brandstof vrijkomen. Omdat er momenteel geen specifieke bodemnormen bestaan voor brandstoffen als benzine en diesel, is ter indicatie gekeken naar de norm voor minerale olie (een somnorm).

Tabel 20 Een selectie van normen voor kobalt, nikkel en minerale olie in grond uit <https://rvs.rivm.nl/onderwerpen/normen>. De normen van minerale olie zijn toegevoegd ter vergelijking voor een scenario met een brand met voertuigen met een brandstofmotor.

	Norm Kobalt (mg/kg)	Norm Nikkel (mg/kg)	Norm Minerale olie (mg/kg)
Kwaliteitseis voor kwaliteitsklasse 'landbouw/natuur' (bij toepassing op de landbodem)	15	35	190
Kwaliteitseis voor kwaliteitsklasse 'wonen' (bij toepassing op de landbodem)	35	39	190
Interventiewaarde bodemkwaliteit (droge stof)	190	100	5000

9.6.2

Vertaling bodemnormen naar impact bij emissies

Bij vergelijking van de geschatte bluswateremissies van 1300 g nikkel en 420 g kobalt met de normen uit [Tabel 20] kan, bij een homogene opmenging met droge standaardgrond die vrij is van kobalt en nikkel, worden berekend welke hoeveelheden grond nodig zijn om de

genoemde normen te bereiken, zie [Tabel 21] en [Tabel 22]. Hieruit blijkt dat nikkel een grotere bijdrage levert aan de overschrijding van bodemnormen dan kobalt. Dit is mede het gevolg van de grotere hoeveelheid nikkel die vrijkomt vergeleken met kobalt.

Naast nikkel en kobalt is in de laatste kolom weergegeven hoeveel grond boven de norm komt bij een lekkage van 10 kg minerale olie. Dit is een indicatieve hoeveelheid die bij een autobrand in de bodem zou kunnen komen. In de praktijk kunnen er per autobrand grote verschillen zijn. In veel gevallen zal een aanzienlijk deel van de brandstof verbranden voordat het de bodem in kan trekken of in een riool stroomt. Bovendien zal een benzinelekkage over het algemeen sneller verdampen dan een diesellekkage, wat betekent dat het type brandstof ook van invloed kan zijn op de omvang van de vervuiling. De beschreven hoeveelheden zijn daarom uitsluitend bedoeld om een indruk te geven van de impact van de bluswateremissies op bodemvervuiling.

Het is belangrijk te vermelden dat de vergelijking tussen vervuiling met minerale olie en zware metalen veel essentiële nuances kent die hier niet (volledig) zijn uitgewerkt. Zware metalen zoals nikkel en kobalt zijn niet biologisch afbreekbaar en blijven permanent in de bodem aanwezig totdat ze fysiek of chemisch worden verwijderd. Minerale olie is daarentegen een organische stof die in enige mate biologisch kan worden afgebroken, wat de sanering in sommige gevallen vergemakkelijkt. Om deze redenen kan met betrekking tot [Tabel 20], [Tabel 21] en [Tabel 22] bodemvervuiling met minerale olie over het algemeen als minder ernstig worden beschouwd dan bodemvervuiling met zware metalen.

Daarnaast kan worden opgemerkt dat:

- Homogene opmenging in de bodem na incidenten in de praktijk geen realistisch scenario is. Het is waarschijnlijker dat onoplosbare schadelijke deeltjes aan het oppervlak liggen of met het bluswater mee stromen.
- In werkelijkheid de bodem niet geheel vrij van nikkel en kobalt is. Vooral in de toplaag kunnen verhoogde concentraties aanwezig zijn. Sommige achtergrondwaarden zijn terug te vinden in de Geochemische atlas van Nederland³⁵.

Tabel 21 Overzicht van hoeveelheid droge grond (ton) die tot aan de norm kan komen bij homogene opmenging met 420 gram kobalt, 1300 gram nikkel en 10 kg minerale olie. Als uitgangspunt geldt dat de grond voor vervuiling vrij is van nikkel, kobalt en minerale olie.

	Kobalt (ton)	Nikkel (ton)	Minerale olie (ton)
Kwaliteitseis voor kwaliteitsklasse 'landbouw/natuur' (bij toepassing op de landbodem)	28	37	53

³⁵ <https://www.rivm.nl/geochemische-atlas>

	Kobalt (ton)	Nikkel (ton)	Minerale olie (ton)
Kwaliteitseis voor kwaliteitsklasse 'wonen' (bij toepassing op de landbodem)	12	33	53
Interventiewaarde bodemkwaliteit (droge stof)	2,2	13	2,0

Bovenstaande tabel geeft hoeveelheden weer in massa-eenheden. Voor een beeld van het maximale volume aan vervuilde grond tot aan een bepaalde norm is in onderstaande tabel weergegeven hoeveel m³ hierbij betrokken is wanneer wordt uitgegaan van droge standaard grond met een massa van 1200 kg/m³.

Tabel 22 Hoeveelheid grond (m³) die tot aan de norm gebracht kan worden bij homogene opmenging met 420 gram kobaltverbinding, 1300 gram nikkel verbindingen en 10 kg minerale olie met droge grond. Als uitgangspunt geldt dat de grond voor vervuiling vrij is van nikkel, kobalt, minerale olie en dat de grond 1200 kg/m³ weegt.

	Kobalt (m ³)	Nikkel (m ³)	Minerale olie (m ³)
kwaliteitseis voor kwaliteitsklasse 'landbouw/natuur' (bij toepassing op de landbodem)	23	31	44
kwaliteitseis voor kwaliteitsklasse 'wonen' (bij toepassing op de landbodem)	10	28	44
Interventiewaarde bodemkwaliteit (droge stof)	1,8	11	1,7

9.6.3

Conclusie verhouding bluswateremissies tot bodemnormen

[Tabel 21] en [Tabel 22] zijn bedoeld ter indicatie dat de ogenschijnlijk geringe hoeveelheden nikkel en kobalt niet verwaarloosbaar zijn. Hoewel het volume criterium zoals genoemd in de Circulaire bodemsanering (curatief) niet wordt overschreden, kan er vanuit de zorgplicht en het preventieve normeringskader in de praktijk wel sprake zijn van een saneringsplicht.

Daarnaast blijkt uit de tabellen dat bij de gegeven scenario's met betrekking tot 'interventiewaarde bodemkwaliteit' de impact van de UHD-blussing groter is dan bij een autobrand waarbij 10 kg minerale olie vrijkomt. Echter, zowel bij een autobrand van een auto met traditionele brandstofmotor als bij een elektrische auto waarbij met UHD-systeem geblust wordt kan bodemsanering noodzakelijk zijn. Bij onverharde bodems betekent dit in de praktijk dat de toplaag wordt afgegraven en (eventueel ter sanering) kan worden afgevoerd. In een bestrate omgeving trekt het bluswater niet snel in de bodem, waardoor een deel van nikkel en kobalt verbindingen op straat en in de zandvangsers van de straatkolk achter zullen blijven. Naar verwachting zullen kleinere deeltjes meespoelen met het riool. De gevolgen daarvan zijn beschreven in de volgende paragraaf [9.7].

Ondanks dat er geen officiële bodemnormen voor lithium bestaan, is het belangrijk te vermelden dat bij het vrijkomen van kathodemateriaal uit lithium-ion-batterijen de mogelijkheid bestaat dat er zich op de plaats van afzetting hoge concentraties hydroxiden kunnen vormen. Deze hydroxiden kunnen in de bovenste laag van de bodem achterblijven. Het is niet uit te sluiten dat in sommige situaties zulke hoge concentraties voorkomen dat de toplaag plaatselijk corrosieve eigenschappen kan ontwikkelen en een risico kunnen vormen bij onbeschermd direct huidcontact.

Wanneer de bodem verhoogde pH vertoont na een blussing van een elektrisch voertuig met NMC batterij, dan is het ook waarschijnlijk dat er verhoogde concentratie zware metalen aanwezig zijn. Zowel zware metalen als hoge concentraties hydroxiden kunnen een risico vormen wanneer dergelijke stoffen in de bewoonde omgeving op de bodem achterblijven waar bijvoorbeeld kinderen op straat spelen. Hoewel de kans op directe of indirecte blootstelling niet overal hetzelfde is, lijkt het verstandig om hier rekening mee te houden in de afwikkeling van een incident en adequate maatregelen te nemen om blootstelling te voorkomen.

Tot slot is het relevant mee te wegen dat bij een incident waarbij de omgeving vervuild raakt, er een zorgplicht van toepassing is. Deze zorgplicht is vastgelegd in de Omgevingswet, waarvan de Regeling bodemkwaliteit 2022 en de Circulaire bodemsanering deel uitmaken³⁶.

9.7 Bluswaterlozing in riool en open water

9.7.1 *Eindpunt van bluswater na lozing in het riool*

Bij een autobrand in een bestrate omgeving kan het bluswater via het riool wegstromen, wat kan leiden tot variaties in de verspreiding van stoffen. Daarbij zijn de volgende soorten rioolafvoersystemen te onderscheiden:

- a) Gescheiden rioolsysteem: In dit systeem zijn er aparte leidingen voor regenwater en afvalwater.
 1. Het afvalwater gaat via een aparte leiding naar de rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) voor behandeling.
 2. Het regenwater wordt doorgaans direct afgevoerd naar oppervlaktewater zoals sloten, vijvers, kanalen of rivieren. Het komt niet in de RWZI terecht.
- b) Gemengd rioolsysteem: In een gemengd systeem worden regenwater en afvalwater samen afgevoerd in hetzelfde riool. Het regenwater komt samen met het afvalwater in de RWZI terecht voor behandeling. In situaties van hevige neerslag kan water van een gemengd rioolsysteem overlopen in open watersystemen (overstort).
- c) Infiltratiesystemen: In sommige gebieden worden systemen gebruikt die regenwater direct terug in de bodem laten infiltreren, zoals wadi's of andere infiltratievoorzieningen.

³⁶ <https://iplo.nl/regelgeving/omgevingswet/zorgplicht/>

Het resultaat van deze drie afvoersystemen is dat het bluswater uit kan komen in:

1. Open water, sloten, vijvers of rivieren.
2. Een RWZI.
3. De bodem door infiltratie. In dit geval gelden op hoofdlijnen vergelijkbare effecten als bij bodemverontreiniging, inclusief de kans dat saneringsmaatregelen moeten worden toegepast zoals toegelicht in voorgaande paragraaf [9.6].

Voordat het bluswater via verschillende straatkolken of rioleringen wordt afgevoerd, kan het verschillende trajecten volgen. Er zijn bijvoorbeeld verschillen tussen straatkolken met ingebouwde zandvangers of bezinkingsruimtes, kolken zonder dergelijke voorzieningen, en rioolstelsels met een apart bezinkingsbekken. De hoeveelheid slecht-oplosbare kathodematerialen die in de zandvanger of het bezinkingsbekken wordt opgevangen, is afhankelijk van factoren zoals de deeltjesgrootte en de stroomsnelheid in het riool. Een goed onderhouden riool, uitgerust met zandvangers en voldoende bezinkingscapaciteit, kan een deel van de zware metalen als sediment opvangen. Deeltjes die minder snel bezinken, evenals bluswater in rioolssystemen zonder zandvangers of bezinkingscapaciteit, zullen waarschijnlijk het eindpunt van de afwatering bereiken.

Wateroplosbare stoffen, zoals fluoriden, lithiumionen en hydroxiden, zullen over het algemeen het eindpunt bereiken, tenzij er onderweg reactie met andere stoffen plaatsvindt of adsorptie aan materialen.

9.7.2 *Overwegingen bij lozing op een regenwaterriool met uitstroom naar open water*

Bluswater dat via het regenwaterriool in sloten, vijvers of rivieren terechtkomt, brengt schadelijke stoffen in het watermilieu. De impact op het ecosysteem hangt naast de hoeveelheid en soort stoffen onder andere af van factoren zoals het watervolume en de uitstroomsnelheid van de plas of sloot, waardoor de gevolgen moeilijk te voorspellen zijn. Emissies van zware metalen zoals kobalt en nikkel moeten echter altijd zoveel mogelijk worden vermeden. Dit valt mede af te leiden uit de relatief lage zoetwaternormen voor de zware metalen kobalt en nikkel: zie [Tabel 23].

Tabel 23 Een selectie van zoet waternormen van kobalt, nikkel, fluoride en lithium uit <https://rvs.rivm.nl/onderwerpen/normen-en-rivm-rapport-2023-0186> [11].

	Norm Kobalt (µg/L)	Norm Nikkel (µg/L)	Norm Lithium (µg/L)	Norm fluoride (µg/L)
Landoppervlakte wateren achtergrondconcentratie (opgelost)	0,1	1	3,5	--
Landoppervlaktewateren JG-MKN of MTR (opgelost) voor chronische blootstelling	0,2 ^a	4 ^a	11 ^b	1500 ^c
Landoppervlaktewateren MAC- MKN (opgelost)	1,36 ^a	34 ^a	210 ^b	-

	Norm Kobalt (µg/L)	Norm Nikkel (µg/L)	Norm Lithium (µg/L)	Norm fluoride (µg/L)
voor kortdurende concentratiepieken				

^a wettelijk vastgestelde norm

^b voorstel RIVM voor beleidsmatig vastgestelde norm, RIVM2023-11[11]

^c beleidsmatig vastgestelde norm

Lithiumionen zijn volledig oplosbaar in water, waardoor deze mobiel zijn en zich snel kunnen verspreiden. Dit kan leiden tot een snelle toename van concentraties, die bij hoge uitstroom echter ook snel kunnen afnemen. De nikkel- en kobaltverbindingen uit NMC kathodematerialen zijn slecht oplosbaar. Dit betekent dat deze stoffen waarschijnlijk eerst op de bodem van een plas of sloot terechtkomen, van waaruit ze langzaam kunnen uitlogen. Omdat het binnen deze context om kleine deeltjes kathodemateriaal gaat, is sprake van een relatief hoge verdelingsgraad, wat in verhouding tot grotere deeltjes zal leiden tot snellere uitloging van stoffen. Lithium beïnvloedt daardoor waarschijnlijk op korte termijn de waterkwaliteit, terwijl nikkel- en kobaltverbindingen eerder op de lange termijn effecten kunnen veroorzaken. Vooral bij een kleine plas of sloot met weinig uitstroom kunnen de gevolgen van de emissies relevanter zijn.

Het RIVM heeft in 2023 een indicatieve milieurisicogrenswaarde voor kortdurende blootstelling voorgesteld van 210 µg/L, zie RIVM2023-0186 [11]. In paragraaf [9.5.2] is geschat dat bij het blussen ongeveer 240 g lithium vrij is gekomen. Hiermee zou in theorie een plas met een volume van ruim 1000 m³ tot boven de indicatieve grenswaarde gebracht kunnen worden.

Daarnaast speelt mee dat bij lithium-ion-batterijbranden een deel van het lithium vrij kan komen als lithiumhydroxide. Ter indicatie: wanneer de geschatte 240 gram vrijgekomen lithium van experiment 2 volledig vrijkomt als lithiumhydroxide (d.w.z. 829 g LiOH) en in een volume demi-water van 1000 m³ zou worden gebracht, dan kan in het volume een pH hoger dan 9,5 bereikt worden. Zoals weergegeven in paragraaf [8.3] is dit in de praktijk niet realistisch, onder andere omdat er ook veel lithiumverbindingen vrijkomen die geen of beperkt hydroxiden kunnen vormen. Daarnaast zijn er in een open wateromgeving verschillende factoren die ervoor zorgen dat een pH-waarde van 9,5 onrealistisch is, zelfs als de plas geen uitstroom heeft. Factoren zoals de buffercapaciteit van het water, reacties met organisch materiaal, aanwezige mineralen en sedimenten, en opgelost CO₂ spelen hierbij een belangrijke rol. Aangezien deze factoren sterk kunnen variëren per locatie, is het niet mogelijk om de exacte effecten op de pH in een ecosysteem nauwkeurig te voorspellen. Toch kan niet worden uitgesloten dat in kleinere waterplassen de pH kan stijgen tot boven de 8,5. Dit geldt met name voor plassen met een aanzienlijk kleiner volume dan 1000 m³ en/of wanneer tijdens de blussing een aanzienlijk grotere hoeveelheid lithiumhydroxide vrijkomt dan hier ingeschat.

Een pH buiten het bereik van 6,5 tot 8,5 wordt als problematisch beschouwd, omdat het buiten de tolerantie ligt van veel

waterorganismen en ecologische processen (zoals nutriëntenbalans en zuurstofhuishouding). Afwijkingen kunnen leiden tot schade aan biodiversiteit en ecosysteemfuncties. Over het algemeen zal een pH-toename door bluswater van een li-ion-batterijbrand tijdelijk van aard zijn.

Zoals weergegeven in [Tabel 23] zijn de normwaarden voor fluoride hoger in vergelijking die voor andere stoffen in de tabel. Bij een emissie van 200 gram fluoride kan theoretisch een watervolume van 133 m³ tot aan de norm worden gebracht. In vergelijking met emissies van lithium, nikkel en kobalt lijkt het in het algemeen onwaarschijnlijk dat fluoriden het grootste risico vormen voor het watermilieu. Dit sluit echter niet uit dat fluorideconcentraties boven de norm van 1500 µg/L nadelige effecten kunnen hebben op aquatische ecosystemen. Omdat fluoriden, net als lithiumionen, mobiel zijn, zullen de concentraties in een plas of sloot met veel doorstroom over het algemeen snel afnemen.

Naast fluoride zijn in [Tabel 13] sulfaat- en chloride-ionen ook verhoogd. Chloride overschrijdt in de afvalwater tank de norm voor oppervlaktewater voor drinkwaterbereiding (150 mg/L) niet. Sulfaat overschrijdt de norm voor oppervlaktewater (100 mg/L) en drinkwater (150 mg/L) bij geen enkel bluswatermonster. De beperkte verhoging van deze anionen wordt daarom niet als relevant beschouwd voor milieu- en gezondheid. Deze normen zijn te vinden op: <https://rvszoekstelsysteem.rivm.nl/Stoffen>.

9.7.3 *Overwegingen bij het lozing op een RWZI*

De mate waarin een RWZI in staat is afvalwater van een UHD-blussing op te vangen kan per RWZI locatie verschillen. Metaaldeeltjes uit kathodemateriaal van elektrische auto's kunnen bij voldoende zwaarte in zandvangsters van het rioolstelsel of de voorbezinktank van het RWZI worden afgevangen; lichtere deeltjes worden naar verwachting minder goed afgevangen. Kleine deeltjes met zware metalen kunnen mogelijk sorberen³⁷ aan actief slib. Hoe effectief RWZI's afvalstoffen uit UHD-blussingen reinigen, is bij de auteurs niet bekend, mede doordat voorzieningen per RWZI verschillen. Zoals eerder toegelicht kan bluswater van een elektrische voertuigbrand in sommige situaties leiden tot een verhoogde pH en een stijging van lithiumionen in het afvalwater. Het is niet bekend of en in welke gevallen dit tot procesverstoring kan leiden bij micro-organismen in de RWZI. Maatregelen kunnen in sommige situaties nodig zijn, onder andere afhankelijk van de lithiumconcentratie en pH van het bluswater.

In vergelijking met een bluswateremissie van een autobrand met verbrandingsmotor zijn relevante verschillen dat minerale olie en brandstoffen grotendeels³⁸ apolair zijn en op het water zullen blijven drijven. Hierdoor kunnen deze stoffen in een RWZI gedeeltelijk afgevangen worden met olie-afscheiders.

³⁷ Sorberen betekent zowel absorptie (opname in bulk) als adsorptie (hechting aan het oppervlak) van deeltjes.

³⁸ Bij Euro 95 E10 benzine is tot 10% ethanol toegevoegd aan de brandstof. Ethanol is goed oplosbaar in water en bij een lekkage van Euro95 E10 zal het ethanol deel na verloop van tijd mengen met het rioolwater.

9.8 Vergelijking depositiewaarden met emissies door UHD-inzet

Bij vergelijking van de grondnormen voor kobalt en nikkel uit [Tabel 20] met de maximaal gemeten depositiewaarden van kobalt (56 mg/m^2) en nikkel (339 mg/m^2) blijkt dat bij een toplaagonderzoek tot een diepte van 10 cm, met een grondmassa van 1200 kg/m^3 , op deze locatie maximaal $0,47 \text{ mg/kg}$ kobalt en $2,83 \text{ mg/kg}$ nikkel in de toplaag van de bodem kan worden aangetroffen (bij schone grond). Deze hoeveelheden liggen aanzienlijk (factor 10 tot 30) onder de normen zoals vermeld in [Tabel 20]. Dit betekent dat de hoeveelheid depositie afkomstig van rookdeeltjes in experiment 2 niet tot een overschrijding van de bodemnormen leidt. Dit resultaat is specifiek voor de context van experiment 2, waarbij nagenoeg de volledige batterij werd aangetast door de brand, maar door UHD-blussing niet de gehele batterij optimaal heeft bijgedragen aan de vorming van deeltjes die via de rook in de depositie terecht konden komen.

Wanneer de geschatte gemiddelde bluswateremissies van nikkel (1300 g) en kobalt (420 g) gelijkmatig worden verspreid over een oppervlak waarbij de hoeveelheden gelijk zijn aan de maximaal gemeten depositie waarden van nikkel (339 mg/m^2) en kobalt (56 mg/m^2), dan is een oppervlakte van ruim 3800 m^2 (nikkel) tot 7500 m^2 (kobalt) nodig om deze hoeveelheden te verspreiden. Het lijkt niet realistisch dat zulke grote oppervlakken dermate vervuild kunnen raken, onder andere omdat uit dit onderzoek blijkt dat nikkel en kobalt verbindingen vooral dichtbij de brand verhoogd aanwezig zijn. Naar verwachting zou dit beeld op hoofdlijnen weinig veranderen wanneer geen UHD-blussing zou zijn uitgevoerd, waardoor de brand in het batterijpakket langer had geduurd en de depositiewaarden in de omgeving beduidend hoger waren geweest.

Op basis van deze vergelijking lijkt het waarschijnlijk dat bij dit experiment de emissie van kobalt en nikkel door de UHD-blussing beduidend groter is dan de totale emissie uit rookgassen. Er is echter ook een onderzoek door RISE uitgevoerd RISE 2020:90 [13], waarbij twee elektrische voertuigen in brand zijn gebracht [zie Bijlage 4]. Deze voertuigen zijn niet geblust. Daarnaast is gedurende de gehele test een propaanbrander met een vermogen van 30 kW ³⁹ onder het batterijpakket geplaatst, waardoor een worst case van totale emissie door rook in kaart is gebracht. Deze worstcase benadering is naar verwachting niet representatief voor een situatie waarin een autobrand in de buitenlucht plaatsvindt. Gezien de min of meer gelijke verhoudingen tussen de kobalt- en nikkelemisssies lijkt het dat dit onderzoek is uitgevoerd met een elektrisch voertuig met een oud type NMC batterij, waarbij mol-verhoudingen tussen nikkel, mangaan en kobalt in de kathode meer gelijk zijn. Deze samenstelling heeft tot gevolg dat er in verhouding tot nikkel meer kobalt en mangaan vrijkomt dan bij een NMC622 batterij.

Wanneer de hoeveelheden van RISE 2020:90 [13] worden geëxtrapoleerd naar een batterij van 75 kWh , dan variëren de totale

³⁹ Ter vergelijking, een aansteker heeft een vlam met een vermogen van orde grootte 25- 30 W en een bunsenbrander heeft een vlam met een vermogen van orde grootte 3-4 kW. Het vermogen van een brander van 30 kW is orde grootte te vergelijken met de vlam van 7,5 tot 10 bunsenbranders samen of ongeveer 1000 aanstekers.

hoeveelheden als volgt: Totale lithiumemissies 163 en 241 g, nikkel-emissies tussen de 612-903 g en kobaltemissies tussen de 482-612 g. Wanneer deze hoeveelheden worden vergeleken met de geschatte emissies in het bluswater bij experiment 2 van 240 g lithium, 1300 g nikkel en 420 g kobalt, dan kan geconcludeerd worden dat er geen significant verschil is tussen beide emissies. Hierbij moeten een aantal belangrijke kanttekeningen worden geplaatst:

1. De worst case omstandigheden van het onderzoek van RISE 2020:90 waarbij gedurende het experiment een 30kW brander de batterij heeft verhit, is niet representatief voor een normale autobrand. Deze testmethode geven naar verwachting resultaten die dichter in de buurt van het theoretisch maximaal haalbare aantal deeltjes zoals beschreven in [Tabel 17]. In de praktijk zal de totale emissie van rook naar verwachting aanzienlijk lager zijn.
2. De totale hoeveelheid metalen die bij experiment 2 via de rook (en uiteindelijk in depositie) zijn vrijgekomen, zijn niet meegenomen in de hierboven genoemde hoeveelheden in het bluswater. Omdat hierboven is geconcludeerd dat de hoeveelheden nikkel en kobalt in depositie bij experiment 2 niet significant zijn, zal dit naar verwachting geen grote verschuiving veroorzaken in de balans.
3. Wanneer een voor huidige standaarden verouderd type batterij is getest, kunnen rookgasemissies mogelijk niet geheel representatief zijn voor huidige li-ion-batterijen.

Tot slot zijn bij het onderzoek van RIVM 2021-0019 [8] uitgebrande batterijen in water gelegd. De manier van "voorbewerking" van de batterijen in dat onderzoek heeft overeenkomsten met wat er zou gebeuren als een elektrische auto niet geblust wordt maar gecontroleerd uitbrandt. Zoals beschreven in paragraaf [9.3] kwamen ook na volledige verbranding van de NMC batterij nog grote hoeveelheden lithium(hydroxiden) vrij, ook al was de batterij volledig uitgebrand, afgekoeld en thermisch stabiel. Dit suggereert dat blussen van een elektrisch voertuig, ongeacht de methode UHD of dompelcontainer, tot gevolg heeft dat wateroplosbare stoffen die nog in de batterijbehuizing aanwezig zijn zich verspreiden in het blus- of koelwater.

Samenvattend kan worden gesteld dat er verschillende indicaties zijn die niet geheel hetzelfde beeld geven. In alle benaderingen leidt het uitbranden van een voertuig echter niet tot hogere emissies van kathodemateriaal vergeleken met de UHD-blussing. Het gebruik van water leidt naar verwachting altijd tot het vrijkomen van meer wateroplosbare stoffen zoals lithiumhydroxide.

Het blussen met een UHD-systeem kan in sommige situaties bijdragen tot een lagere emissie van schadelijke stoffen vergeleken met de methode gecontroleerd uitbranden of dompelcontainer. Dit speelt wanneer blussing met het UHD-systeem de branduitbreiding in de batterij kan stoppen, waardoor er minder batterijmassa bij de brand betrokken raakt.

9.9 Vergelijking meetwaarden dompelcontainer met UHD-inzet

Een belangrijk verschil tussen de bluswateremissies bij een UHD-blussing en het gebruik van een dompelcontainer is de wijze waarop het bluswater vrij kan komen. Bij het gebruik van een dompelcontainer bestaat de mogelijkheid om het bluswater gecontroleerd af te voeren en te verwerken. Bij het gebruik van een UHD-systeem bestaat deze mogelijkheid voor zover bekend op dit moment nog niet.

Daarnaast speelt de slechte oplosbaarheid van NMC kathodemateriaal een belangrijke rol. Wanneer een uitgebrande auto in een dompelcontainer wordt gebracht, zullen naar verwachting slecht-oplosbare deeltjes kathodematerialen (zoals nikkelmangaankobaltoxide en oxiden van nikkel, mangaan en kobalt) over het algemeen gedeeltelijk in de batterijbehuizing achterblijven, omdat het water van de dompelcontainer de batterijbehuizing met minder kracht binnenkomt en er minder spoeling plaatsvindt. Wanneer de batterijbehuizing zich immers eenmaal onder water bevindt, staat het water in de batterijbehuizing stil en stroomt het niet naar buiten, totdat het voertuig uit de container verwijderd wordt.

Het goed-oplosbare lithium zal over het algemeen na verloop van tijd volledig in het water van de dompelcontainer oplossen. Vanuit dat perspectief kan gebruik van een dompelcontainer leiden tot orde grootte gelijke hoeveelheid vrijgekomen lithium, zij het onder gecontroleerde omstandigheden.

Voor een vergelijking kan het interessant zijn om een beeld te hebben van de concentraties metalen in het bluswater van de dompelcontainer. Een aantal bij het RIVM bekende meetgegevens van metalen in bluswater in een dompelcontainer zijn in [Bijlage 1] weergegeven.

10 Conclusies

10.1 Algemeen

De brandexperimenten met elektrische voertuigen in open lucht, gericht op het onderzoeken van een blusmethode, bieden een realistisch beeld van de mogelijke gevolgen voor de omgeving. Wel is vanwege de invloed van weersomstandigheden de reproduceerbaarheid van de test beperkt, en het aantal testen met geslaagde metingen (1 test) statistisch onvoldoende om definitieve conclusies te trekken.

10.2 Rook

De hoogste rookgasconcentraties zijn gemeten na blussing met standaard blusmiddelen. Dit komt enerzijds doordat het blussen de rooktemperatuur verlaagt, waardoor de rook minder opstijgt en de concentraties rookgassen benedenwinds op ademhoogte toenemen [9]. Anderzijds veroorzaakt het blussen meer onvolledige verbranding, waardoor significant meer schadelijke stoffen, zoals bijvoorbeeld koolmonoxide (CO), cyaanwaterstof (HCN) en formaldehyde (HCOH) worden gevormd. Door het blussen stijgt ook de luchtvochtigheid aanzienlijk, waardoor wateroplosbare gassen (HCN en HCOH) en deeltjes kunnen worden opgenomen door gecondenseerde waterdamp en sneller kunnen neerslaan in de directe omgeving van de brand.

Benedenwinds zijn nabij ademhoogte de interventiewaarden van meerdere individuele gassen overschreden. Hierdoor is het mogelijk dat blootstelling aan de rook lichte gezondheidseffecten veroorzaakt of als hinderlijk wordt ervaren. Bij langdurige, onbeschermde blootstelling aan de rook kunnen ernstige of onherstelbare gezondheidseffecten niet worden uitgesloten. Dit komt doordat verschillende schadelijke gassen dezelfde gezondheidseffecten kunnen veroorzaken en omdat naast de gassen ook veel irriterende stofdeeltjes vrijkomen. Met name de aanwezigheid van hydroxiden in het rookstof (stofdeeltjes) kan een relevante bijdrage leveren aan eventuele gezondheidsklachten bij blootstelling. Bij het begin van de brand zijn de lithiumconcentraties in vergelijking met andere batterij-elementen zoals kobalt, mangaan en nikkel in overmaat aanwezig. Dit duidt erop dat lithiumemissies aan het begin van de brand hoger zijn.

De gemeten concentraties fluorwaterstof (HF) overschrijden slechts kortstondig en in beperkte mate de interventiewaarde waarbij lichte gezondheidsklachten kunnen optreden. Fluorwaterstof lijkt daarom bij deze voertuigbrand met een NMC lithium-ion-batterij niet de meest relevante gevaarlijke stof te zijn. Bij een brand met LFP lithium-ion-batterijen zou de vorming van hogere fluorwaterstofconcentraties mogelijk kunnen optreden. Het is dan mogelijk dat fluorwaterstof relevanter wordt in verhouding tot andere irriterende gassen als chloorwaterstof (HCl) en formaldehyde (HCOH). Dit hoeft echter niet per definitie te leiden tot een verhoogd gezondheidsrisico bij blootstelling aan rook van een elektrische voertuigbrand door mogelijke blootstelling aan fluorwaterstof.

De rookgasmetingen tonen dat rookgasconcentraties in open lucht sterk kunnen fluctueren. In de praktijk lijkt het niet erg waarschijnlijk dat personen in de buitenlucht langdurig aan rook van een elektrische voertuigbrand worden blootgesteld, omdat mensen instinctief blootstelling aan de rook zullen proberen te vermijden. Op basis van beeldmateriaal kan worden afgeleid dat rookgasconcentraties op grotere hoogten waarschijnlijk hoger zijn geweest. Daarom is het niet uit te sluiten dat, in vergelijking met deze meetresultaten, rook van een autobrand in een bebouwde omgeving hogere concentraties kan veroorzaken op hoger gelegen delen van gebouwen, zoals bijvoorbeeld een galerijgang van een woongebouw.

10.3 Depositie

De depositieverdeling toont aan dat grote hoeveelheden depositie zich vooral opstapelen op de locaties waar de rookpluim direct overheen is getrokken. Bij experiment 2 lijkt deze strook, op ongeveer 10 meter afstand van de brand, een breedte te hebben van circa 4 tot 6 meter. Tijdens dit experiment werd een relatief constante windrichting waargenomen, wat bijdroeg aan een geconcentreerde afzetting. In de depositie zijn onder andere verhoogde concentraties lithium, nikkel en kobalt aangetroffen. Voor beide experimenten geldt dat de gemeten hoeveelheden depositie ruim onder de grenswaarden van diverse relevante bodemnormen blijven.

In de depositie van NMC-batterij branden is een verband tussen de hoeveelheden lithium, nikkel, mangaan en kobalt. Omdat een groot deel van het lithium hydroxiden vormt, kan een verhoogde pH-waarde dienen als praktische indicatie voor mogelijke vervuiling door nikkel en kobalt. Dit is relevant omdat nikkel- en kobaltverbindingen als zeer zorgwekkende stoffen (ZZS) zijn geclassificeerd en vooral bij herhaalde of langdurige blootstelling gezondheids- of milieurisico's kunnen vormen. Er zijn echter veel factoren die de pH kunnen beïnvloeden waardoor het verband tussen zware metalen en pH als indicatief moet worden beschouwd.

In het nanometerbereik bevatten deeltjes relatief meer lithium in vergelijking met deeltjes in het micrometer- tot millimeterbereik. Hierdoor blijven lithiumhoudende deeltjes langer in de lucht en kunnen ze zich over een groter gebied verspreiden. Kathodematerialen zoals nikkel en kobalt komen daarentegen vaker vrij in grotere deeltjes, die sneller uit de rook neerslaan en dichter bij de brand op de grond terechtkomen. Dit houdt in dat blootstelling aan rook met irriterende lithiumdeeltjes (zoals LiOH , Li_2O en LiF) mogelijk over grotere afstanden kan plaatsvinden, terwijl hoge concentraties zware metalen uit de kathode doorgaans dichter bij de brand te vinden zijn.

De daadwerkelijke mate van vervuiling door de depositie wordt in de praktijk beïnvloed door veel verschillende factoren. Li-ion-batterijen zonder ZZS metalen, zoals ijzerfosfaatbatterijen, veroorzaken in principe geen depositie met nikkel of kobalt. Daarnaast beïnvloeden factoren zoals brandverloop, temperatuur van de rookgassen, blusmethoden, windrichting en de mate waarin de rook wordt gemengd de hoeveelheid depositie die benedenwinds van de brand wordt afgezet.

Zowel de corrosieve eigenschappen van lithiumhydroxiden als de aanwezigheid van zware metalen kunnen bij branden met grotere batterijsystemen ongewenste effecten veroorzaken, met name in het benedenwindse gebied dicht bij de brand. Verhoogde concentraties hydroxiden kunnen in uitzonderlijke gevallen materialen aantasten of huidirritatie veroorzaken.

Nikkel- en kobaltverbindingen kunnen kankerverwekkende (carcinogene) eigenschappen hebben. De schadelijke effecten van deze stoffen zijn met name relevant bij herhaalde en langdurige blootstelling. Consumptie van gewassen die verhoogde gehalten aan zware metalen bevatten is onwenselijk. Hoewel de vervuiling van gewassen naar verwachting vaak beperkt blijft, kan het wel relevant zijn wanneer zich een brand voordoet in de nabijheid van een moestuin of een andere plaats waar consumptiegewassen groeien.

10.4 Bluswater bij gebruik UHD-systeem

Uit het experiment blijkt dat een UHD-systeem een effectief middel is om branden in de batterij van elektrische voertuigen te blussen. Een keerzijde van deze techniek is echter de aanzienlijke hoeveelheid schadelijke stoffen die vrijkomt bij het gebruik ervan. De belangrijkste knelpunten ontstaan door potentieel hoge emissies van lithiumionen, hydroxiden, nikkel en kobalt.

De hoeveelheden vrijgekomen zware metalen nikkel en kobalt worden geschat op ongeveer 1300 gram nikkel en 420 gram kobalt. Er kan een saneringsverplichting volgen wanneer dergelijke hoeveelheden vrijkomen op de bodem. Verspreiding van dergelijke hoeveelheden zware metalen in het watermilieu is ook onwenselijk voor het aquatisch milieu of ecosysteem en kan langdurige effecten veroorzaken.

Als bluswater in een kleine plas of sloot met beperkte uitstroom terecht komt, kan een verhoogde lithiumconcentratie en/of een stijging van de pH acute problemen veroorzaken voor de lokale waterfauna. In vergelijking met de impact van zware metaalemissies zijn deze effecten over het algemeen van kortere duur. De vrijgekomen hoeveelheid lithium wordt geschat op 240 gram. Dergelijke hoeveelheden kunnen vooral een risico vormen in plassen met een watervolume beduidend kleiner dan 1000 m³. Mede om deze reden is het niet wenselijk een UHD-blussing uit te voeren wanneer het regenwaterriool is aangesloten op watersystemen met een volume kleiner dan ongeveer 1000 m³. Hierbij dient te worden benadrukt dat het niet is uit te sluiten dat significant grotere lithiumemissies bij grotere batterijsystemen risico's kunnen vormen voor waterplassen met een volume van 1000 m³ of groter.

In vergelijking tot het gebruik van een dompelcontainer zijn de emissies van het gebruik van een UHD-systeem minder gecontroleerd. Daarnaast is het aannemelijk dat er bij gebruik van een UHD-systeem meer zware metalen uit de batterijbehuizing van het betrokken voertuig gespoeld kunnen worden.

Bij het gecontroleerd laten uitbranden van een elektrisch voertuig zijn de totale emissies naar verwachting doorgaans lager dan bij het gebruik van een UHD-systeem. Echter, als een UHD-systeem in een zeer vroeg stadium van de brand wordt ingezet, nog voordat het vuur zich heeft verspreid naar het volledige batterijpakket, dan kan de inzet van een UHD-systeem ook leiden tot lagere emissies.

De totale bluswateremissie kan samenhangen met diverse factoren zoals batterijtype en capaciteit, ladingspercentage van de batterij, mate van uitbreiding van brand binnen het accupakket en de eventuele aanwezigheid van openingen aan de onderzijde van de batterijbehuizing.

Hoewel de schattingen van de totale bluswateremissies met voorzichtigheid moeten worden geïnterpreteerd, zijn er meerdere signalen dat het gebruik van een UHD-systeem relevante milieu- en, in bepaalde situaties, gezondheidsrisico's kan opleveren. Dit laatste kan spelen wanneer na een UHD-inzet hoge concentraties hydroxiden en zware metalen op de bodem achterblijven in een woongebied waar bijvoorbeeld kinderen buiten spelen.

Bij een UHD-inzetmethode waarbij het bluswater niet wordt opgevangen en sediment met zware metalen en hydroxiden achterblijft op de bodem, is het vanuit milieuperspectief gewenst de UHD-methode met terughoudendheid in te zetten. Het gebruik van een UHD-systeem zou dan beperkt blijven tot situaties waarin het laten uitbranden of het gebruik van een dompelcontainer geen haalbare alternatieven zijn. Daarnaast kunnen na afloop saneringsmaatregelen vereist zijn in de omgeving waar de blussing heeft plaatsgevonden.

Als de UHD-blusmethode zo kan worden doorontwikkeld dat de bluswateremissies vanuit (specifiek) de UHD-blussing grotendeels kunnen worden opgevangen, biedt deze methode potentieel ook een kans om de milieuschade door branden met elektrische voertuigen te verminderen. Vanuit milieuperspectief is dit een gewenste ontwikkeling.

Tot slot is er een grote kans dat de kleding en het gereedschap van de UHD-bediener worden vervuild met mogelijk gezondheidsrelevante hoeveelheden van schadelijke stoffen, waaronder de zware metalen nikkel en kobalt. Nikkel en kobalt kunnen zowel kankerverwekkende (carcinogene) eigenschappen hebben als huidirritatie en allergische reacties veroorzaken. De gezondheidseffecten zijn met name relevant bij langdurige en herhaalde blootstelling. Daarnaast kunnen materialen en kleding dermate hoge hydroxiden bevatten dat het oppervlakken corrosief worden. Het is daarom belangrijk om hiermee rekening te houden bij beschermende kleding en arbeidshygiëne.

11 Aanbevelingen

Dit onderzoek leidt tot een aantal aanbevelingen voor vervolgonderzoek en afhandeling van branden met elektrische voertuigen en branden met grote li-ion-batterijsystemen.

1. Onderzoek de hoeveelheid stoffen die vrijkomen via het bluswater

De brandexperimenten die door het NIPV en partners zijn uitgevoerd, hebben waardevolle kennis en ervaring opgeleverd over branden met elektrische voertuigen en li-ion-batterijen. De experimentele opzet was niet ontworpen om te bepalen hoeveel materiaal er terechtkomt in het bluswater door inzet van een UHD-blussysteem. Met een andere onderzoeksopzet zou de totale emissie van zowel oplosbare als niet-oplosbare fracties in (UHD) bluswater onderzocht kunnen worden. In dit rapport zijn de totale hoeveelheden van de emissie naar het bluswater afgeleid met behulp van meetgegevens aangevuld met informatie uit de literatuur. Een aangepaste onderzoeksopzet kan deze hoeveelheden nauwkeuriger in beeld brengen waarmee de gemaakte schatting in dit rapport getoetst kan worden. Hiermee kan een scherper beeld verkregen worden van de totale milieu-impact van blusprocedures bij elektrische voertuigen.

2. Onderzoek de mogelijkheden om de schadelijke emissie van UHD-bluswater naar de omgeving te voorkomen

Dit rapport vormt een aanleiding om onderzoek te doen naar maatregelen om de emissie van schadelijk stoffen via UHD-bluswater te verminderen of te voorkomen. Een aantal mogelijke opties worden hier genoemd gericht op het voorkomen van emissies of het beperken ervan.

Allereerst kan worden onderzocht voor welke praktijksituaties de inzet van een UHD-blussysteem de meest passende optie is. De inzet van een UHD-blussysteem dient bewust te worden afgewogen ten opzichte van andere blusopties. De specifieke eigenschappen van een brand, lokale omstandigheden en veiligheids- en milieurisico's zijn van belang om een passend afwegingskader op te stellen.

Ten tweede kan worden onderzocht hoe de emissie van vervuild UHD-bluswater naar de omgeving kan worden voorkomen of beperkt. Het blussen met UHD-blussystemen verbruikt, in verhouding met standaard blusmethoden, relatief weinig water. Dat biedt mogelijkheden voor het opvangen en afvoeren van dit bluswater. Ook zijn er aanwijzingen dat de wijze van gebruik van het UHD-systeem de bluswateremissie beïnvloedt. Wanneer bijvoorbeeld dieper in een batterij wordt gesneden kan er een gat in de bodem van de batterijbehuizing ontstaan. Ingebracht bluswater loopt dan weer weg. Het gevolg is dat er doorlopend water moet worden toegevoegd om het waterniveau in de batterijbehuizing op pijl te houden. Als gevolg daarvan ontstaat er naar verwachting meer vervuild bluswater. Ook het aantal penetratiepunten in de batterij kan de mate van vervuiling mogelijk beïnvloeden.

Onderzoek naar het opvangen van UHD-bluswater in de praktijk en het ontwikkelen van een UHD-gebruikersinstructie leveren inzichten op waarmee milieuschade kan worden voorkomen. Ten derde kan worden onderzocht wanneer en hoe de locatie na een blussing van de brand met een UHD-systeem moet worden schoongemaakt. Het vervuilde UHD-bluswater dat eventueel vrijkomt, kan een gezondheidsrisico vormen voor mensen bij direct contact. Daarnaast kan het een milieurisico vormen voor bodem en water. Op basis van onderzoek lijkt het mogelijk om een "best practices" te ontwikkelen om ongewenste blootstelling aan en emissies van corrosieve stoffen en zware metalen te beperken tot aanvaardbare niveaus.

3. Overwegen van het ontwikkelen van standaard veldmethoden om potentiële vervuiling door depositie van li-ion batterijbranden in beeld te krijgen en wanneer nodig mitigerende maatregelen te treffen.

Dit rapport toont aan dat verhoogde pH-waarden in depositie mogelijk zijn in de directe omgeving van een brand met li-ion-batterijen. In situaties waar grote hoeveelheden li-ion-batterijen betrokken zijn (zoals bij een elektrische vrachtauto of buurtbatterij), kunnen benedenwinds van de brand verhoogde hoeveelheden hydroxiden voorkomen. In uitzonderlijke gevallen kan onbeschermde blootstelling leiden tot huidirritatie, schade aan gewassen, of lichte aantasting van coatings zoals autolak en verf.

Bij branden met grote batterij-systemen waarin zware metalen zijn verwerkt (NMC, NCA) kan een verhoogde pH-waarde samengaan met verhoogde concentraties zware metalen. Daarnaast kunnen in sommige gevallen zware metalen op gewassen voor consumptie terechtkomen, bijvoorbeeld in moestuinen. Hoewel de mate van vervuiling over het algemeen beperkt zal zijn, is elke inname van zware metalen ongewenst. Dit kan waarschijnlijk in veel gevallen verminderd worden door gewassen goed af te spoelen. Dit rapport kan echter geen duidelijkheid geven over de vraag of bepaalde blootgestelde gewassen in specifieke situaties geschikt of ongeschikt zijn voor consumptie.

Bij branden van grote li-ion-batterijssystemen kan het nuttig zijn om de pH-waarde van materialen of gewassen in het benedenwindse gebied nabij de brand indicatief te meten (bijvoorbeeld met bevochtigd pH-papier). Als de pH-waarde een bepaalde grens overschrijdt, bijvoorbeeld pH 9 of 10, kan het zinvol zijn om deze gewassen of materialen grondig af te spoelen.

Bij het spoelen dient rekening gehouden te worden met het feit dat lithiumoxide (Li_2O) zijn corrosieve eigenschappen pas bij contact met water ontwikkelt. Grondig spoelen is daarom essentieel. Wanneer te weinig gespoeld wordt, bijvoorbeeld bij kortstondig gebruik een waternevel, kan een geringe hoeveelheid loog ontstaan, wat juist schade kan veroorzaken. Dit risico bestaat overigens ook wanneer niet wordt gespoeld en lithiumoxide in contact komt met water uit dauw of lichte regenval.

4. Schoon en veilig werken

Wanneer bluswater enige tijd in de batterijbehuizing van een uitgebrande li-ion-batterij aanwezig is, kunnen zeer hoge concentraties hydroxiden ontstaan. Bluswater dat uit de batterijbehuizing komt, heeft daardoor een relatief grote kans om corrosief te zijn. Oog- of huidcontact met dit bluswater kan letsel veroorzaken. Vooral bij oogcontact kunnen zonder adequate behandeling de gevolgen ernstig zijn.

Naast hydroxiden kunnen ook zware metalen, zoals nikkel en kobalt, in kleine deeltjes vrijkomen. Personen die regelmatig betrokken zijn bij de bestrijding van li-ion-branden of het bedienen van apparatuur zoals een UHD-systeem, kunnen bij inadequate arbeidshygiëne worden blootgesteld aan zware metalen. Bij herhaaldelijke blootstelling kan dit een verhoogd gezondheidsrisico opleveren.

Voor personen die bij de bestrijding of in de afwikkeling van een elektrische voertuigbrand regelmatig in contact komen met geconcentreerd bluswater is het relevant veilig te werken. Voor zware metalen is het belangrijk om aandacht te besteden aan arbeidshygiëne (schoon werken) om de kans op herhaalde en/of langdurige blootstelling te minimaliseren.

Dankwoord

Dit rapport is mede tot stand gekomen dankzij de uitnodiging van het NIPV aan het RIVM om als gast deel te nemen aan hun onderzoek. Het NIPV (en partners) heeft een plan uitgewerkt om via brandexperimenten oplossingen te vinden voor de ervaren knelpunten bij het blussen van branden met elektrische voertuigen. Namens de auteurs van dit rapport willen we Tom Hessels en Henk Brans in het bijzonder bedanken voor deze uitnodiging. Daarnaast willen we de betrokken organisaties die hebben bijgedragen aan het brandexperiment met elektrische voertuigen bedanken voor dit initiatief:

Organisaties:

- NIPV
- Werkgroep VDA/VDIK,
- Brandweer Amsterdam Airport Schiphol,
- Veiligheidsregio Haaglanden
- Veiligheidsregio Utrecht,
- Brandweer Amsterdam-Amstelland,
- Coldcut Systems,
- Bedrijfsbrandweer TATA steel
- Gezamenlijke Brandweer

Literatuur

1. T. Hessels & H. Brans, NIPV, Brandexperiment over de inzet van ultrahogedruk snij- en blussystemen bij branden in batterijen van elektrische voertuigen, 2024
2. Fredrik Larsson, Petra Andersson, Per Blomqvist & Bengt-Erik Mellander "Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires", Nature scientific reports, 2017
3. RISE report 2023:22, Jonna Hynynen, Ola Willstrand, Per Blomqvist, Maria Quant, Investigation of extinguishing water and combustion gases from vehicle fires, 2023
4. Arnaud Bordes , Arnaud Papin, Guy Marlair, Théo Claude, Ahmad El-Masri, Thierry Durussel, Jean-Pierre Bertrand, Benjamin Truchot and Amandine Lecoc, Batteries 2024, Assessment of Run-Off Waters Resulting from Lithium-Ion Battery Fire-Fighting Operation.
5. Chen, S.; Wang, Z.; Yan, W. , Journal of Hazardous Materials. 2020, 400, 123169, Identification and characteristic analysis of powder ejected from a lithium ion battery during thermal runaway at elevated temperatures.
6. Zhang, Y.; Wang, H.; Li, W.; Li, C.; Ouyang, M. Size distribution and elemental composition of vent particles from abused prismatic Ni-rich automotive lithium-ion batteries. J. Energy Storage 2019, 26, 100991
7. Rongqi Peng, Depeng Kong, Ping Ping, Wei Gao, Gongquan Wang, Shenglan Gong, Can Yang, Xinzeng Gao, Xu He, Experimental investigation of the influence of venting gases on thermal runaway propagation in lithium-ion batteries with enclosed packaging, 2025
8. RIVM-briefrapport 2021-0019, N. van Veen, A. Koppen, E.M. van Putten, Risico's van rook door branden van li-ion-batterijen, 2019
9. RIVM-briefrapport 2024-0034, M. van der Linden, E. Kooi, M. de Bode Warmte, pluimstijging en depositie bij brand, 2024
10. Peter J. Bugryniec, Erik G. Resendiz, Solomon M. Nwophoke, Simran Khanna, Charles James, Solomon F. Brown, Journal of Energy Storage 87 (2024) 111288 Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure - Considering toxic and flammable compounds.
11. RIVM briefrapport 2023-0186, M. Faber, C.E. Smit, , Indicatieve milieurisicogrenzen voor lithium in oppervlaktewater, 2023
12. Irvin Glassman, Richard A Yetter and Nick G. Glumac, Combustion (5th edition), 2014
13. RISE Report 2020:90, Ola Willstrand, Roeland Bisschop, Per Blomqvist, Alastair Temple, Johan Anderson, Toxic gases from fire in electric vehicles, 2020
14. Shichen Chen, Zhirong Wang*, Wei Yan Identification and characteristic analysis of powder ejected from a lithium ion battery during thermal runaway at elevated temperatures Elsevier Journal of Hazardous materials, 2020
15. Mahieu K, Geraets L, Bos P. Interventiewaarden voor incidentbestrijding: interventiewaarden, stofdocumenten en handleiding RIVM, 2025.
16. Kai Liu, Yayuan Liu, Dingchang Lin, Allen Pei, Yi Cui, Materials for lithium-ion battery safety, 2018

17. DNV-GL, Technical Reference for Li-ion battery explosion risk and fire suppression, 2019
18. Teresa L. Barone, Thomas H. Dubaniewicz, Sherri A Friend, Isaac A. Zlochower, Aleksandar D Bugarski & Naseem S. Rayyan. Lithium-ion battery explosion aerosols: Morphology and elemental composition, 2021
19. Depeng Kong, Hongpeng Lv, Ping Ping, Gongquan Wang, A review of early warning methods of thermal runaway of lithium ion batteries, 2023
20. Lukáš Preisler, Simona Jonášová, Jiří Pospíšil, Tomáš Sitek, Renata Komendová, Size Distribution and Elemental Analysis of Fine Particles from Li-Ion Battery Cell Fire, 2025
21. Arumugam Manthiram, A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry, 2020
22. Thomas Waldmann, Björn-Ingo Hogg, Margret Wohlfahrt-Mehrens, Li plating as unwanted side reaction in commercial Li-ion cells – A review, Journal of power Sources 384 (2018) 105-124, 2018
23. <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion> & <https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries>

Afkortingenlijst

EV	Elektrisch Voertuig
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
ICPMS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
LCO	Lithium Cobalt Oxide (type li-ion-batterij)
LFP	Lithium Iron Phosphate (type li-ion-batterij)
NCA	Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide
NIPV	Nederlands Instituut Publieke Veiligheid
NMC	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide
PAK	Polycyclische aromatische koolwaterstoffen
PVC	Polyvinylchloride
RWZI	Rioolwaterzuiveringsinstallatie
SEI	Solid electrolyte interphase
UHD	Ultrahogedruk
ZZS	Zeer zorgwekkende stoffen

Bijlage 1 Meetwaarden bluswater in dompelcontainer

Branden in elektrische auto's zijn lastig te blussen wanneer de batterij betrokken is bij de brand. Ook na blussen kan na verloop van tijd herontsteking plaatsvinden in de batterij. Om dit te voorkomen, worden uitgebrande auto's regelmatig in een dompelcontainer geplaatst. Dit is een container waarin het batterijpakket van de auto ruim onder water kan worden gebracht.

Het RIVM heeft in 2019 een tweetal bluswatermonsters op elementen geanalyseerd van een dompelcontainer waarin uitgebrande elektrische voertuigen werden gekoeld. De voertuigen waren eerst langdurig met traditionele blusmiddelen gekoeld/geblust. Vervolgens hebben de uitgebrande voertuigen enkele dagen in een container met water gestaan, waarna door het RIVM monsters zijn genomen van het bluswater in de container.

Beide analyses lieten zeer lage gehalten aan metalen zien. Dit resultaat kwam niet overeen met de verwachting, namelijk dat er minstens hoge gehalten lithium en mogelijk ook verhoogde concentraties van andere metalen zouden worden aangetroffen, afhankelijk van het batterijtype. Het is mogelijk dat tussen het dompelen en het nemen van het monster bepaalde stoffen zijn neergeslagen of chemisch zijn omgezet, waardoor deze niet langer in oplossing waren en dus niet zijn bemonsterd. Dit proces kan hebben geleid tot de niet-representatief lage meetresultaten. Vanwege deze lage en waarschijnlijk niet-representatieve waarden is afgezien van vervolgmetingen en verdere rapportage volgens deze methode.

Tabel 24 Overzicht van de maximaal gemeten concentraties van elementen in een container met ongeveer 22 m³ koelwater. De meetwaarden worden als niet-representatief gezien voor emissies van li-ion-batterijen.

element	maximaal gemeten concentratie (mg/L)	totale hoeveelheid in container (g)
Li	0,015	0,33
Ni	0,006	0,13
Mn	0,44	9,68
Cu	0,12	2,64
Zn	0,73	16,06
Fe	1,57	34,54
Al	0,09	1,98

De gehalten van [Tabel 24] zijn voor de volledigheid opgenomen in deze bijlage. Hierdoor kan ten onrechte de indruk ontstaan dat het bluswater van elektrische voertuigen in dompelcontainers lage gehalten aan oplosbare stoffen bevat. Dat dit beeld niet klopt, blijkt ook uit een ander meetresultaat: bij een koelwateranalyse uit de veiligheidsregio Midden- en West-Brabant, waar in 2019 een elektrische sportwagen (BMW i8) is

uitgebrand en vervolgens in een watercontainer is ondergedompeld, werden hogere gehalten gemeten.

Een overzicht van bluswateranalyses uit de dompelcontainer toonden 16 mg/L fluoride, 20,9 mg/L chloride en 12 mg/L lithium. Andere metalen waren op het analyserapport niet vermeld. Wanneer ter orde grootte beeldvorming als uitgangspunt wordt genomen dat zich in de dompelcontainer +/- 10 m³ water bevond (2,5 x 5,0 x 0,8 m), dan is in dit koelwater ongeveer 160 g fluoride aanwezig, 209 g chloride en 120 g lithium. Dit is ongeveer de helft van de bij experiment 2 geschatte emissie van 240 g lithium. Hierbij dient nadrukkelijk vermeld te worden dat de waterhoeveelheid van 10 m³ een grove schatting is zonder degelijke onderbouwing. De resultaten dienen slechts ter orde grootte indicatie, maar lijken een representatiever beeld van de vervuiling van bluswater te geven dan de meetwaarden uit [Tabel 24].

Vanuit dit perspectief lijken de lithiumemissies bij gebruik van een dompelcontainer en het gebruik van een UHD-systeem bij de experimenten in dezelfde orde grootte te liggen. Het grootste verschil ligt in de gecontroleerde omstandigheden waarmee het bluswater kan worden afgevoerd. Ook zullen slecht-oplosbare kathodematerialen, zoals nikkelmangaankobaltoxide, een grotere kans hebben om in de batterijbehuizing van het uitgebrande voertuig achter te blijven.

Bijlage 2 Brandverloop experiment 1

In deze bijlage is beknopte achtergrond informatie weergegeven over rookverspreiding bij experiment 1. Bij dit experiment is het positioneren van de mobiele FTIR niet goed verlopen, omdat de kar niet altijd geheel benedenwinds stond. Daarnaast steeg de rook hoofdzakelijk boven de meetopstelling. Bij de eerste blussing werd de meetapparatuur door waterstralen geraakt waarna besloten is de mobiele meetapparatuur te verplaatsen naar een drogere locatie. Op deze plek is nog nauwelijks rook gemeten.

Gedetailleerde informatie over het verloop van dit experiment is te vinden in de bijlage van Hessels & Brans 2024 [1].

Figuur 18 Indruk van de pluimstijging en bij experiment 1 op tijdstip 10:07 uur en 10:08 uur. De rook stijgt deels over en naast de meetapparatuur (rode cirkel om mobiele FTIR en luchtstofbemonstering). Foto's: Hessels en Brans 2024



Figuur 19 Inzet van de blussing bij experiment 1 (Foto's: Hessels en Brans 2024). Na deze blussing is de meetapparatuur verplaatst. Op tijdstip 10:17 uur wordt de auto vanaf de bestuurder zijde geblust, waardoor de rook van de meetapparatuur wordt weggeduwd.

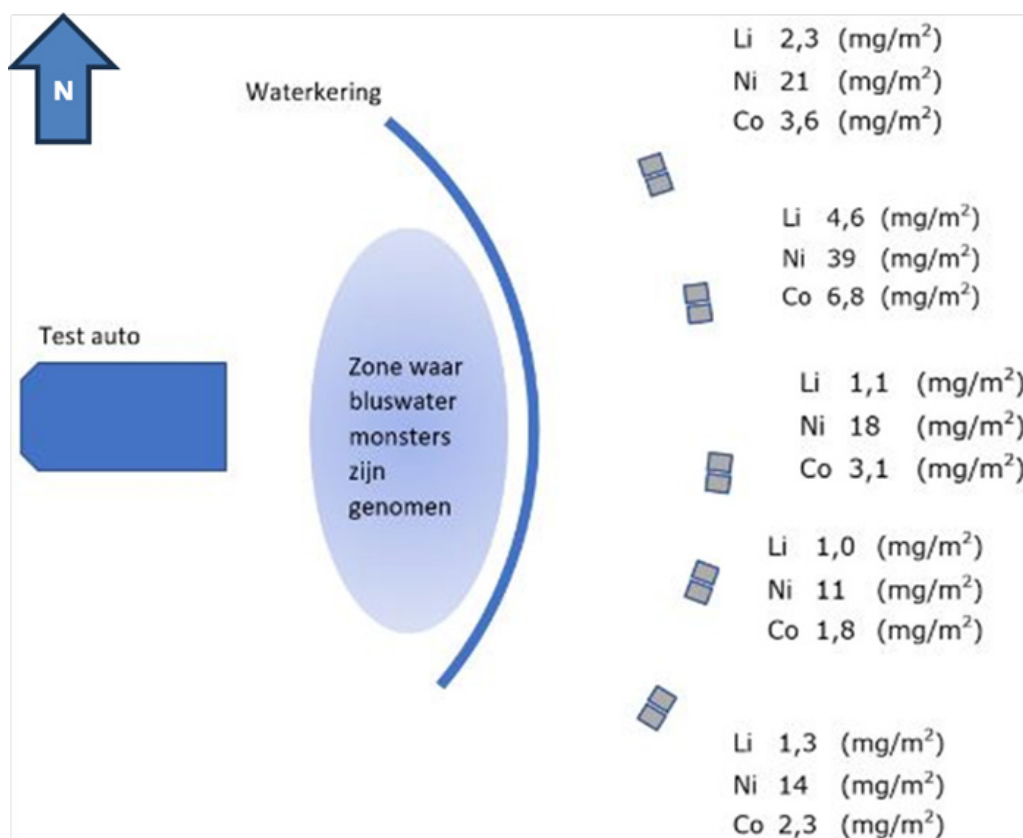


De brand bij dit experiment is na de eerste boring (9:50 uur) niet direct uitgelopen op een ontwikkelde brand. Om 10:03 uur is een tweede boring uitgevoerd. Tijdens een derde boorpoging om 10:04 uur ontstaat een brand die vanaf 10:16 uur wordt geblust met lage druk stralen. Om 10:32 uur start de UHD-blussing. De CO meetwaarden vertonen verhogingen tijdens de start van de brand rond 9:53 en enkele minuten na 10:04, zie ook [Figuur 5] van paragraaf [5.2.2].

Bijlage 3 Visuele weergave depositie metingen

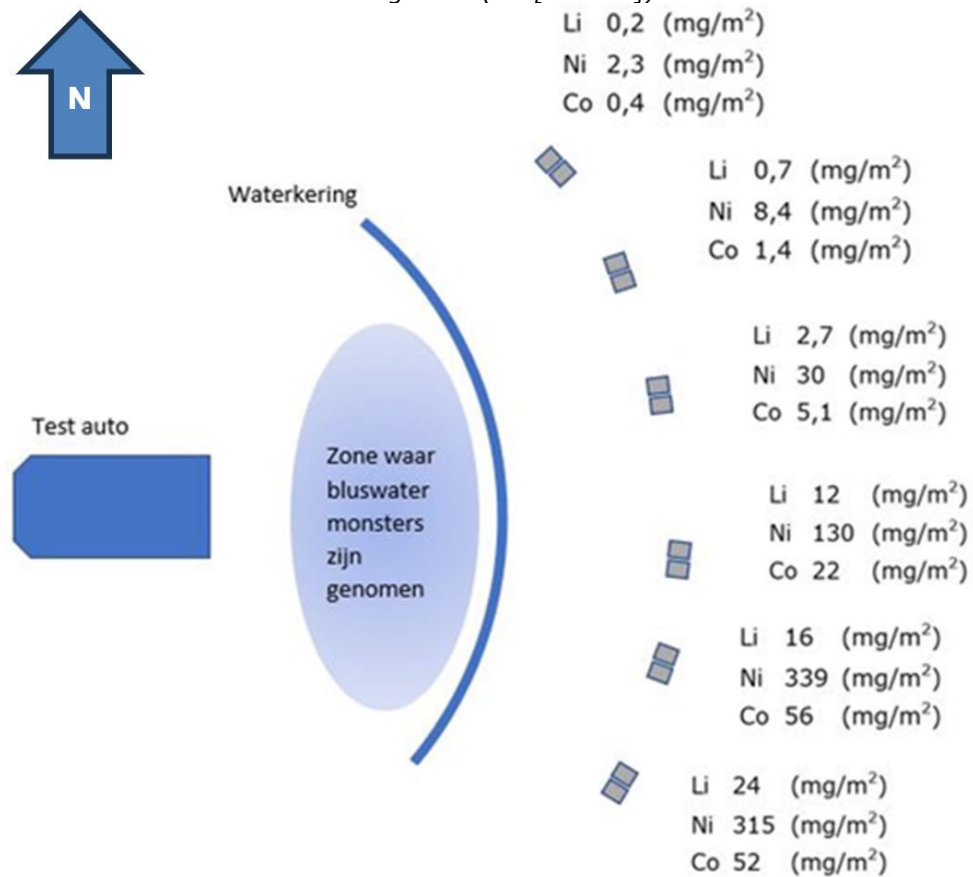
Deze bijlage geeft een visueel overzicht van de gemeten depositiehoeveelheden per depositielocatie van de elementen lithium, nikkel en kobalt van experiment 1 en 2. De elementen lithium, nikkel, mangaan en kobalt geven een kenmerkend patroon in de depositie van branden met li-ion-batterijen. Vooral lithium, nikkel en kobalt zijn relevant vanwege milieurisico's en gezondheidskundige grenswaarden. Daarom worden de hoeveelheden van deze stoffen in het onderstaande overzicht weergegeven.

Figuur 20 Visuele weergave depositiemetingen experiment 1. De windrichting was tijdens het experiment hoofdzakelijk 250 graden (zie [Tabel 1]).



In de afbeelding is te zien dat de meetwaarden bij depositiepunt 6 (het meest zuidelijke punt) nog relatief hoog zijn. De rookpluim is niet zichtbaar verder naar het zuiden gedraaid, waardoor relevante hoeveelheden depositie 2 meter zuidelijker dan depositiepunt 6 naar verwachting niet zijn gemist.

Figuur 21 Visuele weergave depositiemetingen experiment 2. De windrichting varieerde tussen de 250 en 280 graden (zie [Tabel 1]).



Bijlage 4 Totaal metaal emissies van rook

Het onderzoeksinstituut RISE heeft meerdere brandexperimenten met elektrische voertuigen uitgevoerd waarbij emissie van rookstof is onderzocht door rookstof te verzamelen, kwantificeren en analyseren.

In 2020 is het RISE Report 2020:90 [13] gepubliceerd waarin emissies van een brandexperiment met een elektrisch voertuig met een capaciteit van 40 kWh en 25 kWh is beschreven. Bij dit experiment zijn (voor zover bekend) geen blusactiviteiten ingezet. De batterijen van de voertuigen waren voor 80% geladen.

In 2023 is RISE Report 2023:22 [3] gepubliceerd over emissies van een brandexperiment met een elektrisch voertuig met een capaciteit van 50 kWh. Daarnaast is eenzelfde gedemonteerde batterij van 50 kWh aan dezelfde test onderworpen. De batterij van dit voertuig en de losse batterij zijn allebei voor 90% geladen. Bij deze experimenten zijn op diverse momenten sprinklerinstallaties gebruikt. Analyses van dit bluswater zijn gefilterd voor analyse, van het filtraat zijn geen gegevens gevonden. Het is de auteurs van dit RIVM rapport daarom niet geheel duidelijk welke fractie van deeltjes door een sprinkler installatie zijn neergeslagen.

Tabel 25 Totale hoeveelheden rookstof van twee RISE onderzoeken. De hoeveelheden Li, Ni, Mn en Co van RISE 2020:90 zijn berekend op basis van de gegevens uit dat rapport. Bij RISE 2023:22 zijn sprinkler systemen ingezet waardoor de weergegeven hoeveelheden lager zijn dan wat er in totaal is vrijgekomen.

	RISE 2020:90		RISE 2023:22	
	BEV A 40 kWh	BEV B 25 kWh	BEV 50 kWh	Battery 50 kWh
Totaal rookstof (kg)	11	17	5,2	2,8
Li (g)	128	54	50	155
Mn (g)	278	158	40	89
Co (g)	257	204	48	105
Ni (g)	482	204	258	555

Beide rapporten tonen totale lithium emissies tussen 50 en 155 g, nikkel emissies tussen de 204-555 g en kobalt emissies tussen de 48-257 g per experiment.

De rookgassen zijn met 23 tot 25 m³/s afgevoerd. In een rookgaskanaal met een diameter van 1 m resulteert dit in lichtsnelheden in orde grootte 30 m/s. Het is de auteurs van onderhavige rapport niet bekend of deze lichtsnelheid invloed heeft op de bemonstering van de roetdeeltjes.

Wanneer de emissies lineair geëxtrapoleerd worden naar een batterij van 75 kWh, dan zouden de volgende totale emissies verwacht worden.

Tabel 26 Meetwaarden van RISE 2020:90 en RISE 2023:22 lineair geëxtrapoleerd naar een batterij van 75kWh. Bij RISE 2023:22 is een sprinkler systeem gebruikt dat gemeten emissies kan beïnvloeden.

	RISE 2020:90		RISE 2023:22	
	BEV A 75 kWh	BEV B 75 kWh	BEV 75 kWh	Battery 75 kWh
Li (g)	241	163	75	233
Mn (g)	522	474	60	134
Co (g)	482	612	72	158
Ni (g)	903	612	387	833

Beide rapporten tonen bij een 75kWh extrapolatie totale lithium emissies tussen 75 en 241 g, nikkel emissies tussen de 387-903 g en kobalt emissies tussen de 72-612 g per experiment. Bij RISE 2023:22 [3] is een sprinklersysteem gebruikt waardoor een significant deel van de roetdeeltjes zal worden neergeslagen door het sprinklerwater. Wanneer metingen met sprinkler buiten beschouwing worden gelaten, dan gelden de volgende geëxtrapoleerde hoeveelheden: Totale lithium emissies tussen 163 en 241 g, nikkel emissies tussen de 612-903 g en kobalt emissies tussen de 482-612 g per experiment.

Tijdens beide tests is gedurende de volledige testduur een 30 kW propaanbrander onder het batterijpakket geactiveerd. Dit kan hebben geleid tot hogere emissies in vergelijking met een situatie waarin geen extra warmtebron onder het testvoertuig aanwezig was.

Bijlage 5 Li-ion-batterijen in een notendop

Voor een goed begrip van dit rapport is het wenselijk enige achtergrondkennis te hebben van li-ion-batterijen. Deze bijlage beschrijft op hoofdlijnen de werking van, het type en het brandrisico van li-ion-batterijen.

Inleiding

Li-ion-batterijen zijn een veelgebruikte technologie vanwege hun hoge energiedichtheid, lange levensduur en brede toepassingen, variërend van consumentenelektronica tot elektrische voertuigen en energieopslag. Afhankelijk van de gebruikte chemie en samenstelling zijn er verschillende typen li-ion-batterijen, elk met unieke eigenschappen en toepassingen. Op <http://www.batteryuniversity.com> is informatie over li-ion-batterijen te vinden. Deze bijlage is een samenvatting van informatie die hier te vinden is. Doordat li-ion-batterijen doorlopend in ontwikkeling zijn, kan informatie op onderdelen na verloop van tijd verouderd raken.

Basisprincipe li-ion-batterij

Een lithium-ion-batterij is een oplaadbare batterij waarin lithium-ionen (Li^+) bewegen tussen twee elektroden: de anode (negatieve elektrode), meestal gemaakt van grafiet, en de kathode (positieve elektrode), vaak bestaande uit een lithium-metaaloxide (zie batterijtypen onderaan de bijlage). Deze beweging van ionen vormt de basis van de energieopslag en -afgifte in de batterij.

Opladen en ontladen

Bij het opladen wordt elektrische energie aangevoerd via een oplader. Deze energie dwingt lithium-ionen (Li^+) om vanuit de kathode door het elektrolyt naar de anode te migreren. In de anode worden de lithium-ionen opgeslagen in de grafietlagen, een proces dat "intercalatie" wordt genoemd. Tegelijkertijd stromen elektronen via een externe stroomkring van de kathode naar de anode, om een ladingsevenwicht te bewaren. Het elektrolyt speelt hier een cruciale rol door als geleidend medium te dienen voor de lithium-ionen, terwijl het verhindert dat elektronen intern door de batterij stromen.

Bij het ontladen, wanneer de batterij energie levert aan een apparaat, gebeurt het omgekeerde. Lithium-ionen bewegen vanuit de anode via het elektrolyt terug naar de kathode en worden opnieuw geïntegreerd in het kathodemateriaal (re-intercalatie). Elektronen stromen via een externe stroomkring van de anode naar de kathode, wat elektrische energie levert aan het aangesloten apparaat.

Het elektrolyt

De elektrolyt in een li-ion-batterij is meestal een organische vloeistof die ionen transporteert maar elektrische isolatie biedt tegen elektronen. De typische samenstelling van het elektrolyt bevat:

1. Organische oplosmiddelen, zoals ethyleencarbonaat (EC), dimethylcarbonaat (DMC), en di-ethyleencarbonaat (DEC), die een hoge ionenmobiliteit mogelijk maken.

2. Lithium-zouten, zoals lithiumhexafluorofosfaat (LiPF_6), dat zorgt voor de mobiliteit van lithium-ionen en tegelijkertijd de stabiliteit van het elektrolyt verhoogt. Andere zouten zoals lithium tetrafluoroboraat (LiBF_4) of lithium perchloraat (LiClO_4) worden soms ook gebruikt.

Het elektrolyt transporteert exclusief lithium-ionen binnen de batterij en voorkomt elektrische kortsluiting, doordat elektronen niet door het elektrolyt kunnen stromen.

Solid Electrolyte Interphase (SEI)

Een essentieel element dat bijdraagt aan de stabiliteit van de batterij is de Solid Electrolyte Interphase (SEI). Deze dunne, stabiele laag vormt zich op het oppervlak van de anode tijdens de eerste laadcyclus door een chemische reactie tussen het elektrolyt en de anode. De SEI is meestal samengesteld uit anorganische lithiumverbindingen, zoals lithiumfluoride (LiF) en lithiumcarbonaat (Li_2CO_3), samen met sommige organische componenten.

De SEI is doorslaggevend voor de levensduur van de batterij, omdat het verdere onwenselijke reacties van het elektrolyt met de anode voorkomt, terwijl het lithium-ionen toelaat om er doorheen te bewegen. Tegelijkertijd kan de SEI elektrische geleiding blokkeren, waardoor energieverlies en degradatie worden geminimaliseerd.

De separator

De separator is een dun, poreus membraan dat de anode en kathode fysiek gescheiden houdt om kortsluiting te voorkomen. Hij is vaak gemaakt van polymeren zoals polyethyleen (PE), polypropyleen (PP) of een combinatie daarvan. Deze materialen vormen een stabiele en dunne structuur die selectief lithium-ionen doorlaat, maar tegelijkertijd voorkomt dat elektronen direct tussen de anode en kathode stromen.

De separator is kritisch voor het veilig functioneren van de batterij, omdat een defect in dit onderdeel kan leiden tot kortsluiting of thermische runaway.

Samenspel van processen

Het goed functioneren van een li-ion-batterij berust op een nauwkeurig samenspel van ionen- en elektronenstromen:

- Elektronenstromen (extern via een stroomkring):
 - o Bij opladen: Elektronen bewegen van de kathode naar de anode.
 - o Bij ontladen: Elektronen bewegen van de anode naar de kathode, en voorzien een apparaat van energie.
- Ionentransport (intern via de elektrolyt):
 - o Bij opladen: Lithium-ionen bewegen van de kathode naar de anode via het elektrolyt.
 - o Bij ontladen: Lithium-ionen bewegen in omgekeerde richting, van de anode naar de kathode.

Met deze coördinatie tussen de verschillende componenten kunnen li-ion-batterijen hoge energie- en vermogensdichtheid bieden. Dit maakt ze ideaal voor toepassingen zoals consumentenelektronica, elektrische voertuigen en energieopslag in netwerken.

Li-ion-batterij typen

Er zijn verschillende soorten li-ion-batterijen. Het type is voornamelijk afhankelijk van het soort kathode of anode.

1. Lithium-Cobalt-Oxide (LCO)

- Samenstelling: Kathode van Lithium-Cobalt-Oxide (LiCoO_2), Anode is meestal van grafiet.
- Energiedichtheid: 150-250 Wh/kg.
- Kenmerken:
 - o LCO-batterijen hebben een hoge energiedichtheid en worden veel gebruikt in draagbare elektronica, zoals smartphones, laptops en tablets.
 - o Ze hebben echter een relatief korte levensduur (300-500 cycli) en een lage warmte- en laadstabiliteit, waardoor ze minder geschikt zijn voor toepassingen met hoge belasting, zoals elektrische voertuigen (EV).
- Toepassingen: Consumentenelektronica.

2. Lithium-Mangaan-Oxide (LMO)

- Samenstelling: Kathode van Lithium-Mangaan-Oxide (LiMn_2O_4) Anode is meestal grafiet.
- Energiedichtheid: 100-150 Wh/kg.
- Kenmerken:
 - o LMO-batterijen staan bekend om hun thermische stabiliteit en verbeterde veiligheid.
 - o Hoewel de energiedichtheid lager is dan die van LCO, compenseren ze dit met een langere levensduur en betere prestaties bij hoge stroomafgifte.
 - o Vaak worden LMO-batterijen gecombineerd met andere chemieën (bijvoorbeeld NMC) om de energiedichtheid te verhogen.
- Toepassingen: Elektrische gereedschappen, fietsen en hybrides.

3. Lithium-Nikkel-Mangaan-Cobalt-Oxide (NMC)

- Samenstelling: Mix van Nikkel (Ni), Mangaan (Mn) en Kobalt (Co) in de kathode. Anode is meestal grafiet.
- Energiedichtheid: 150-220 Wh/kg (sterk afhankelijk van de specifieke samenstelling).
- Kenmerken:
 - o NMC is een van de meest gebruikte chemieën in elektrische voertuigen vanwege de goede balans tussen hoge energiedichtheid, levensduur en veiligheid.
 - o De (mol)verhouding van nikkel, mangaan en kobalt (bijvoorbeeld 8:1:1, 6:2:2) bepaalt de focus op prestaties of energiedichtheid.
 - o NMC-batterijen hebben ook een relatief lange levensduur.
- Toepassingen: Elektrische voertuigen, energieopslagsystemen en medische apparatuur.

4. Lithium-IJzer-Fosfaat (LFP)

- Samenstelling: Kathode van Lithium-IJzer-Fosfaat (LiFePO_4). Anode is meestal grafiet.
- Energiedichtheid: 90-120 Wh/kg (toename tot 160Wh/kg).
- Kenmerken:

- o LFP-batterijen hebben een lagere energiedichtheid, maar leveren uitstekende veiligheidskenmerken, zoals hoge thermische stabiliteit en een lange levensduur (tot 2000+ cycli).
- o Ze worden steeds populairder als alternatief voor NMC in elektrische voertuigen, vooral in markten waar kosten en veiligheid belangrijker zijn dan energiedichtheid.
- Toepassingen: Elektrische bussen, energieopslag, en budgetvriendelijke EV's.

5. Lithium-Nikkel-Cobalt-Aluminium-Oxide (NCA)

- Samenstelling: Kathode van Lithium-Nikkel-Cobalt-Aluminium (LiNiCoAlO_2). Anode is meestal grafiet.
- Energiedichtheid: 200-260 Wh/kg (300 Wh/kg voorspeld).
- Kenmerken:
 - o NCA-batterijen bieden een van de hoogste energiedichtheden onder de li-ion-batterij technologieën, wat ze ideaal maakt voor EV met lange actieradius.
 - o Ze hebben een relatief lange levensduur, maar zijn minder stabiel en vereisen uitgebreide beveiligingssystemen.
 - o Tesla maakt gebruik van NCA-cellen in zijn EV vanwege de behoefte aan energieopslag met hoge prestaties.
- Toepassingen: Elektrische voertuigen en gespecialiseerde industriële toepassingen.

6. Lithium-Titanium-Oxide (LTO)

- Samenstelling: Anode van Lithium-Titanium-Oxide ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$). Kathode kan LMO, LFP of NMC zijn.
- Energiedichtheid: 50-80 Wh/kg (toename tot 110 Wh/kg).
- Kenmerken:
 - o LTO-batterijen hebben een relatief lage energiedichtheid, maar kunnen extreem snel worden opgeladen en bieden uitzonderlijke levensduur en veiligheid.
 - o Ze presteren goed in extreme temperaturen, maar hun lagere energiedichtheid beperkt hun gebruik voor grootschalige energieopslag of EV met een lange actieradius.
- Toepassingen: Snel laders, energieopslag in koude of warme regio's, en industriële voertuigen.

Brandrisico's li-ion-batterijen (thermal runaway)

Een thermal runaway in een lithium-ion batterij is een ongecontroleerde temperatuurstijging waarbij de batterij zichzelf oververhit. Omdat een li-ion-batterij veel energie in een klein volume opslaat, kan deze energie tijdens thermal runaway in korte tijd vrijkomen. Dit proces ontstaat door een kettingreactie: warmte ontleedt de materialen in de batterij, waardoor meer warmte vrijkomt en de reactie wordt versneld. Mogelijke oorzaken zijn interne kortsluiting (vaak door schade aan de separator), overlading, extreme temperaturen of fysieke beschadiging. Tijdens thermal runaway kunnen gassen ontstaan, wat brand of explosie kan veroorzaken. Dit maakt het een belangrijk veiligheidsrisico in toepassingen zoals elektrische voertuigen en elektronica.

Bijlage 6 Monsternamen en analyse methode

In deze bijlage zijn methode en details van analyse en monsternamen apparatuur beschreven die bij de veldmetingen en laboratorium analyses zijn gehanteerd.

Luchtstofbemonstering

- Apparaat: Derenda Medium Volume Sampler
- Pompdebiet: 5 Nm³/u
- Filters: Total Suspended Particulate (TSP) filters (glasvezel)

Gasmetingen (gas FTIR)

- Apparaat: Bruker Matrix MG2 FTIR
- Spectrale resolutie: 0,5 cm⁻¹
- Scantijd: 15 seconden.
- Atmosfeer meetcel: 180 °C en 1013 mbar

De spectrale bandbreedten die zijn toegepast voor kwantificatie van de in dit rapport genoemde gassen zijn weergegeven in onderstaande tabel. Voor diverse gassen zijn een of meer interfererende gassen meegenomen in de kwantificatie, waarvan vaak H₂O.

Tabel 27 Spectraal bereik per gas voor kwantificatie.

Compound	spectral range start	spectral range eind
CH ₄	3005	3020,8
CO	2096	2114
CO ₂	2280	2310
HCOH	2745	2787
H ₂ O	2005	2050
HCl	2767	2801
HCN	3250	3280
HF	4172	4203

Elementenanalyses (ICP-MS)

- Apparaat: ICP-MS: Thermo Scientific iCAP RQ
- Interne methode: GZB-781 - Bepaling metaalgehalten in MOD monsters (Versie 1)

Ionchromatografie

- Apparaat: Shimadzu Ion Chromatograaf IC-LC-20Ai
 - LC kolom: Shim-pack IC-SA3, 250 x 4,0 mm (Shimadzu art. 228-41600-91)
 - LC guard kolom: Shim-pack IC-SA3 CG 10 x 4,6 mm (Shimadzu art. 228-41600-92)
- Interne methode: GZB-792 Bepaling van het gehalte anionen in MOD monsters met behulp van LC-IC (Versie 1)

Bijlage 7 Meetresultaten bluswater alle elementen

In paragraaf [7.3] is een selectie weergegeven van meetwaarden van het bluswater. Hierbij zijn gemiddelden weergegeven van verschillende monsters. In deze bijlage zijn de individuele meetwaarden van monsters weergegeven, inclusief een uitgebreider aantal elementen.

Er is ook een monster genomen bij experiment 1 vóór het moment dat de UHD-blussing is ingezet. Dit monster kan een indruk geven van bluswatervervuiling door een reguliere inzet met lage druk stralen. Bij het raadplegen van de meetwaarden is het relevant om mee te wegen dat:

- Bij experiment 1 de brandpropagatie in de batterij mogelijk beperkt was, waardoor de meetwaarden van het bluswater lager uitvallen vergeleken met een batterijbrand waarbij de brand zich volledig uitbreidt naar de gehele batterij.
- Monsters van experiment 2 (voor inzet UHD-blussing) zijn genomen op de locatie waar eerst een UHD-blussing van experiment 1 is uitgevoerd. Het is niet uit te sluiten dat metalen van experiment 1 zijn bemonsterd bij de eerste monsters van experiment 2 en daardoor gehalten verhogen. Vooral bij de monsters voor inzet van het UHD-systeem bij experiment 2 kan dit leiden tot een vertekend beeld van bluswatervervuiling van een standaard blussing.

De meetgegevens zijn weergegeven op de twee volgende pagina's.

Tabel 28 Volledig overzicht van elementen in bluswatermonsters van experiment 1 en 2 (deel 1)

		Bluswater blanco	Experiment 1	Experiment 2	Experiment 2	Experiment 2	Experiment 2	Experiment 2	Experiment 2	Experiment 2
		Monster 1	Monster 2	Monster 3	Monster 4	Monster 5	Monster 6	Monster 7	Monster 8	Monster 9
	LOQ (mg/l)	Tijdstip (mg/l)	10:25 (mg/l)	14:27 (mg/l)	14:27 (mg/l)	14:28 (mg/l)	14:33 (mg/l)	15:15 (mg/l)	15:18 (mg/l)	15:20 (mg/l)
Li	0,015	< 0,0	1	10,6	7	12	19	275	297	10
B	0,015	0,0	0,5	1,4	1,0	2	1,2	9	10	0,9
Mg	0,015	9,4	13,3	8,7	24,5	34	23,4	82	83	10,1
Al	0,015	1,6	4	3	7	14	6,4	329	396	1,8
Si	0,015	3,256	9,85	4,69	9,61	15,5	4,73	65,9	69,3	3,746
Ca	0,015	5,08	16,9	40,46	28,2	32,3	8,9	19	21	5,66
Ti	0,015	0,038	0,33	0,36	0,5	1,0	0,2	3	5	0,06
V	0,015	< 0,015	< 0,0	< 0,0	< 0,0	< 0	< 0	0	0	< 0,0
Cr	0,015	< 0,015	0,02	< 0,02	< 0,0	0,0	< 0,0	0	0	< 0,02
Fe	0,015	0,20	3,46	0,44	1,6	5,4	1,19	18	22	0,36
Mn	0,015	0,0	0,3	0,3	1,2	4	2,8	93	102	0,72
Ni	0,015	< 0,015	1,578	1,892	9,928	34,538	18,472	872,01	967,28	2,977
Co	0,015	< 0,015	0,28	0,32	1,70	5,774	3,515	144,81	158,20	0,457
Cu	0,015	0,126	0,897	0,611	1,909	3,337	0,804	36,068	47,650	0,126
Zn	0,015	1,506	5,509	7,930	6,498	12,726	3,098	57,403	71,304	0,477

Tabel 29 Volledig overzicht van elementen in bluswatermonsters van experiment 1 en 2 (deel 2)

	LOQ (mg/l)	Bluswater blanco	Experiment 1	Experiment 2	Experiment 2	Experiment 2	Experiment 2	Experiment 2	Experiment 2	Experiment 2
		Monster 1	Monster 2	Monster 3	Monster 4	Monster 5	Monster 6	Monster 7	Monster 8	Monster 9
		Tijdstip	10:25	14:27	14:27	14:28	14:33	15:15	15:18	15:20
		(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
Ga	0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	0,089	0,102	< 0,015
As	0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	0,089	0,105	< 0,015
Se	0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	0,158	0,189	< 0,015
Sr	0,015	0,300	0,616	1,245	0,925	1,039	0,385	0,524	0,557	0,344
Mo	0,015	< 0,015	0,106	0,503	0,342	0,612	0,186	0,225	0,233	0,180
Ag	0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	0,027	0,033	< 0,015
Cd	0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Sn	0,015	< 0,015	0,019	< 0,015	0,019	0,033	< 0,015	0,159	0,197	< 0,015
Sb	0,015	< 0,015	0,155	0,106	0,118	0,154	0,090	0,636	0,726	0,027
Te	0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Ba	0,015	0,020	2,801	5,078	3,662	4,491	0,933	3,778	4,578	0,074
Hg	0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Tl	0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Pb	0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	0,053	0,076	< 0,015
Bi	0,015	< 0,015	0,087	0,014	0,035	0,072	0,016	0,246	0,369	< 0,015

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

Nederland

www.rivm.nl

augustus 2025

De zorg voor morgen
begint vandaag