

Veiligheid van zero-emissiematerieel in de logistiek en bouw



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

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2025

Auteurs	J. Reinders, T. van Harn, H. Brans, T. Hessels en C. Stähler
Contactpersoon	I. Janssen

Opdrachtgever	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Contactpersoon	A. Butter

Datum	17 september 2025
-------	-------------------

Foto cover	NIPV
------------	------

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

Inhoud

	Samenvatting	5
	Inleiding	9
	Onderzoeksmethode	12
	Deel I - Algemeen	15
1	Wet- en regelgeving	16
1.1	Inleiding	16
1.2	Europese wet- en regelgeving	16
1.3	Nederlandse wet- en regelgeving	19
1.4	Normen en richtlijnen	23
2	Batterijen	27
2.1	Opbouw van een lithium-ion batterij	27
2.2	Werking van een lithium-ion batterij	28
2.3	Lithium-ion subtypen	30
2.4	Veiligheidsrisico's van lithium-ion batterijen	31
2.5	Batterijmanagementsysteem (BMS)	35
2.6	Innovaties	35
3	Waterstof	38
3.1	Brandstofcellen (FCEV)	38
3.2	H ₂ -verbrandingsmotoren (H ₂ -ICE)	38
3.3	Veiligheidsrisico's van waterstof	39
3.4	Hydrozine (Mierenzuur)	41
	Deel II – Logistiek	43
4	Systeembeschrijving zero-emissiematerieel in de logistiek	44
4.1	Voertuigcategorieën	44
4.2	Batterij-elektrisch aangedreven voertuigen	45
4.3	Waterstof aangedreven voertuigen	46
4.4	Laadinfrastructuur	47
4.5	Ongevallencasuïstiek	48
5	Voorbeeldscenario's logistiek	54
5.1	Brand elektrische vrachtwagen	55
5.2	Elektrische vrachtwagenbrand bij depot	62
5.3	Waterstofvuilniswagen	63
6	Maatregelen voor brandveiligheid logistiek	67

7	Incidentmanagement logistiek	76
7.1	Gebruikte informatie	76
7.2	Opzet handelingsperspectief	77
7.3	Elektrisch aangedreven logistieke voertuigen	77
7.4	Waterstof aangedreven vrachtwagen	83
	Deel III - Bouw	87
8	Systeembeschrijving emissieloos bouwen op de bouwplaats	88
8.1	Energievoorziening bouwplaatsen	88
8.2	Zero-emissiebouwmaterieel	89
8.3	Veiligheidsrisico's elektrische zero-emissiebouwmachines	92
8.4	Waterstofaggregaten	92
9	Voorbeeldscenario's bouw	96
9.1	Brand elektrische bouwmaschine	96
9.2	Kleine elektrische graafmaschine in pandig	101
9.3	Waterstofaggregaat	104
10	Maatregelen voor brandveiligheid bouw	107
11	Incidentmanagement bouw	114
11.1	Incidentmanagement elektrische bouwmaschine	114
11.2	Incidentmanagement bouwmaschine in pandig	118
11.3	Incidentmanagement waterstof(aggregaat)	119
12	Conclusie	123
	Referentielijst	125
	Bijlage 1: Toelichting aanvullende informatiebronnen maatregelen logistiek	130
	Bijlage 2: Toelichting aanvullende informatiebronnen maatregelen bouw	131
	Bijlage 3: Betrokken organisaties	133

Samenvatting

Aanleiding

Waar zero-emissie (met name batterij-elektrische) personenauto's en bussen en gangbaar zijn in Nederland, is ook in de bouw- en logistieke sector een toename te zien van zero-emissiematerieel. Deze ontwikkeling is cruciaal voor de verduurzaming van de energievoorziening, maar brengt tegelijkertijd nieuwe (brand)veiligheidsrisico's met zich mee.

Uit enkele recente onderzoeken naar de veiligheid van zero-emissiematerieel gebruikt binnen de sectoren logistiek en bouw kwam een aantal kennishiaten naar voren met betrekking tot incidentmanagement en brandveiligheid. Zero-emissiematerieel omvat voer- en werktuigen die via lithium-ion batterijen of waterstof van energie worden voorzien. In opdracht van de RVO en het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, worden, voor wat betreft de sectoren bouw en logistiek, deze kennishiaten in deze studie geadresseerd. Voor de sector bouw richt de studie zich op mobiele machines en voertuigen op bouwlocaties met een batterijvermogen van minimaal 8 kW. Voor logistiek betreft het voertuigen binnen de RDW-categorie N1 (bestelwagen), N2 of N3 (vrachtwagen) met kentekenplicht.

De studie omvat drie delen. In het eerste deel worden algemene aspecten relevant voor zowel bouw als logistiek behandeld zoals wet- en regelgeving en de basisprincipes van de energiesystemen, alsook de werking en risico's verbonden aan het gebruik van deze systemen. Dit gedeelte bestaat grotendeels uit een samenvatting van verzamelde en geanalyseerde openbare en wetenschappelijke literatuur. Hierna worden de bedrijfssectoren logistiek en bouw separaat behandeld. Aan de hand van een beschrijving van de gebruikte systemen, gerapporteerde incidenten en voorbeeld (incident)scenario's worden maatregelen ter beheersing van risico's en activiteiten voor incidentmanagement geïdentificeerd.

Algemene aspecten

Lithium-ion batterijen

Zowel in de logistieke als bouwsector worden momenteel (vrijwel) uitsluitend batterijen van het type lithium-ion toegepast. Het belangrijkste veiligheidsrisico van deze batterijen is een thermal runaway waarbij toxische en brandbare gassen vrijkomen waardoor een toxische wolk, brand of een explosie kan ontstaan. Vroegtijdige detectie via batterijmanagementsystemen (BMS) is cruciaal om escalatie te voorkomen, maar blussing blijft een uitdaging vanwege de afgeschermded constructie van batterijpakketten. Bluswater kan de hittebron vaak moeilijk bereiken, waardoor langdurige inzet noodzakelijk is. De huidige inzet tactieken van de brandweer zijn nog onvoldoende afgestemd op zero-emissiematerieel. Tenzij van verwisselbare batterijpakketten gebruik wordt gemaakt, zijn dompelcontainers doorgaans niet toepasbaar en is demonteren of verplaatsen van batterijen niet altijd mogelijk. Hierdoor richt brandweerinzet zich in de praktijk vooral op het voorkomen

van uitbreiding van de brand naar de omgeving. Zodoende ontbreken nog inzet tactieken voor effectieve bronbestrijding van batterijbranden in elektrisch materieel en wordt de behoefte onderstreept voor onderzoek naar nieuwe of aanvullende inzet tactieken.

Waterstof

Voor wat betreft waterstof zullen de hogedrukcilinders in voer- en werktuigen de belangrijkste veiligheidsrisico's vormen. Uiteraard kan ook in of bij andere onderdelen brand ontstaan maar gezien de geringe energie-inhoud van deze systemen zullen deze naar verwachting een kleiner risico vormen dan de waterstofcilinders. Relevante incidentscenario's zijn een fakkelbrand, die brandoverslag naar de omgeving kan veroorzaken, of een gaswolkexplosie die kan plaatsvinden indien waterstof als gevolg van een lekkage vrijkomt, zich ophoopt en daarna ontsteekt. Voor hybride systemen (zoals brandstofcel-elektrische voer- en werktuigen) vormen niet alleen de waterstof-drukcilinders een gevaar, maar ook de aanwezigheid van het batterijpakket, hetgeen deze situatie complexer maakt.

Wet- en regelgeving

Wat betreft de relevante wet- en regelgeving is in deze studie onderscheid gemaakt tussen Europese en internationale regelgeving en Nederlandse regelgeving. Onder Europese en Internationale regelgeving vallen de machinerichtlijn, EMC richtlijn, Pressure Equipment Directive, ATEX regelgeving, ADR en de kaderverordening. Onder Nederlandse wetgeving vallen de Omgevingswet en bijbehorende Besluiten, arbowetgeving, de warenwet, wet vervoer en gevaarlijke stoffen, typegoedkeuring voertuigen en netcode elektriciteit. De studie naar wet- en regelgeving laat zien dat deze kaders veelal generiek zijn en (nog) niet specifiek zijn toegesneden op de combinatie van nieuwe energievormen met zero-emissiematerieel binnen complexe werkomgevingen zoals bouwplaatsen of distributiecentra. Wel bestaan er, vaak technische, normen en richtlijnen gericht op de veilige implementatie van batterijen en waterstof, zoals NEN-normen, NFPA-standaarden en de Publicatiereeksen Gevaarlijke Stoffen.

Risicobeheersing en incidentbestrijding binnen logistiek

In de logistiek wordt steeds vaker gebruik gemaakt van batterij-elektrische en waterstof-aangedreven voertuigen voor goederenvervoer. Het betreft onder meer zware trucks, vuilniswagens en bestelauto's, die veelal worden geladen op centrale laadpleinen met DC-laders. De laadinfrastructuur vormt daarmee een kritieke schakel in de bedrijfsvoering én een potentiële risicofactor. De analyse van twee bestaande ongevals casussen met zero-emissiematerieel in de logistiek illustreren een aantal veiligheidsuitdagingen in de logistieke sector. Bij een bezorgdienst vond tijdens het opladen van een elektrisch voertuig rookontwikkeling plaats tussen gestalde voertuigen. De brandweer paste een nieuwe blus techniek toe door direct water in het batterijpakket te spuiten, wat effectief bleek, maar niet universeel toepasbaar is. In Kopenhagen leidde een brand in een elektrische vuilnis truck tot een herontsteking van het batterijpakket. Omdat een passende dompelcontainer ontbrak, werd het batterijpakket in overleg met de fabrikant gedemonteerd en gefaseerd ondergedompeld. Dit incident toont aan hoe essentieel kennis van (veilige) batterijdemontage is voor een veilige afhandeling.

In deze studie zijn drie voorbeeld-incidentscenario's uitgewerkt. In het eerste scenario (N3-vrachtauto met lading) ontstaat een batterijbrand na een aanrijding, met risico op branduitbreiding naar de omgeving. Het tweede scenario beschrijft een thermal runaway tijdens het laden op een depot, waarbij meerdere voertuigen kunnen worden bedreigd door branduitbreiding. Het derde scenario betreft een waterstofvuilniswagen waarin waterstoftanks door brand worden verhit, waardoor een veiligheidsventiel open gaat en een fakkelbrand ontstaat, die brand in de omgeving kan veroorzaken. In gesloten docks of bij clustering van voertuigen kunnen rookverspreiding, brandoverslag of toxische blootstelling de gevolgen verergeren.

Concreet vraagt dit om een doordachte ruimtelijke inrichting van laadpleinen (voldoende afstand of afscherming) en directe bereikbaarheid van voertuigen voor hulpdiensten.

Blusmiddelen en punten voor waterwinning dienen voldoende beschikbaar en snel inzetbaar te zijn. Daarnaast is het van belang dat zaken als sleutels, technische specificaties en contactgegevens van specialisten bij incidenten direct beschikbaar zijn voor de hulpverleners. Incidentmanagement vereist verder dat personeel wordt geïnstrueerd om bij rookontwikkeling niet handmatig in te grijpen. Vroegtijdige signalering / alarmering via BMS-data vormt een belangrijk aandachtspunt voor snelle interventie en schadebeperking.

Risicobeheersing en incidentbestrijding binnen de bouw

In de bouw worden steeds meer zero-emissiewerktuigen geïntroduceerd, waaronder elektrische graafmachines, schaarhoogwerkers en waterstofaggregaten. Voor de energievoorziening wordt soms gebruik gemaakt van openbare laadpalen (al dan niet in combinatie met een adapter) maar op bouwplaatsen bestaat deze ook vaak uit tijdelijke laadcontainers of mobiele energieopslagsystemen, met variabele laadlocaties en beperkte voorzieningen voor incidentbestrijding. Uit een incident bleek het belang van voldoende bluswater, technische ondersteuning op locatie en snelle toegang tot pompvoorzieningen. Op een bouwplaats ontstond namelijk brand in een waterstofaggregaat, vermoedelijk door een thermal runaway in het batterijpakket. De brandweerlieden bluste onder dekking en koelde de batterij tot een pompcontainer arriveerde.

Ook voor de bouw zijn drie voorbeeld-incidentscenario's uitgewerkt. Het eerste scenario betreft brand van een grote elektrische wiellader op een bouwplaats. In het tweede scenario vat een kleine elektrische schaarhoogwerker vlam in een stationshal, met snelle rookontwikkeling tot gevolg. Het derde scenario beschrijft een incident met een waterstofaggregaat, waarbij waterstofcilinders worden aangestraald na een batterijbrand in het aggregaat.

In deze context zijn diverse maatregelen van belang. Zo kunnen grote bouwmachines en mobiele energieopslagsystemen fysiek worden afgeschermd van brandbare materialen en strategisch worden gepositioneerd met vrije toegang voor hulpdiensten. Snelle beschikbaarheid van (mobiele) blusmiddelen is cruciaal, evenals het vooraf aanwijzen van veilige opstelplekken voor bouwmachines, aggregaten of batterijsystemen.

Incidentmanagement vraagt bovendien om heldere instructies voor aanwezige bouwmedewerkers. Tot slot is het van belang dat technische ondersteuning snel inzetbaar is, en dat hulpdiensten beschikken over toegang tot sleutels of technische gegevens van het betreffende werktuig.

Door de veranderlijke aard van de werkomgeving kan incidentbestrijding bij zero-emissiematerieel in de bouw niet alleen technisch uitdagend, maar ook organisatorisch complex kan.

Inleiding

Aanleiding

Waar zero-emissie (met name batterij-elektrische) personenauto's en bussen gangbaar zijn in Nederland¹, is ook in de bouw- en logistieke sector een toename te zien van zero-emissiematerieel (ELaadNL, 2025). Deze ontwikkeling is cruciaal voor de verduurzaming van de energievoorziening, maar brengt tegelijkertijd nieuwe (brand)veiligheidsrisico's met zich mee.

Recent zijn enkele onderzoeken uitgevoerd naar de veiligheid van batterij-elektrisch en waterstof-aangedreven bussen (CROW, 2022a) en naar de veiligheid van elektrische voertuigen in de logistiek en elektrische voer- en werktuigen in de bouw (DNV, 2022). Het onderzoek naar de bussen werd uitgevoerd in het kader van het Bestuursakkoord Zero-emissie OV-Bussen (BAZEB). Het onderzoek naar de logistiek en bouw werd uitgevoerd voor de Nationale Agenda Laadinfrastructuur (NAL). Uit deze onderzoeken is een aantal kennishiaten naar voren gekomen, met name met betrekking tot incidentmanagement en brandveiligheid.

Voor bussen zijn deze hiaten reeds geadresseerd in enkele vervolgstudies (CROW, 2022b, 2023; van Harn & Hessels, 2024). Voor de sectoren bouw en logistiek is hiervoor, in opdracht van de RVO en het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, het programma '*Brandveiligheid en incidentmanagement zware zero-emissie voertuigen*' opgesteld door NIPV. Het programma bevat een onderzoekdeel (kennisopbouw) en een deel waarin de opgedane kennis zal worden verspreid (kennisdeling). Dit rapport bevat de resultaten van het gedeelte gericht op kennisopbouw. In dit deel worden enkele van de in (DNV, 2022) vastgestelde kennishiaten geadresseerd.

Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om door antwoord te geven op de zes onderstaande onderzoeksvragen invulling te geven aan enkele aanbevelingen uit de studie "Veiligheid elektrisch rijden en laden" (DNV, 2022) met betrekking tot kennishiaten op het gebied van brandveiligheid en incidentbestrijding bij het gebruik van zero-emissievoer- en werktuigen in de sectoren bouw en logistiek. Het betreft de volgende onderzoeksvragen:

- > Met betrekking tot brandveiligheid (veiligheidsrisico's en beheersing hiervan):
 1. Hoe ziet het brandverloop eruit en wat betekent dit voor veiligheidsafstanden?
 2. Wat is de impact van branden van materieel op de omgeving zoals ander materieel, tunnels of garages (logistiek) of in aanbouw zijnde constructies (bouw)?

¹ Ca. 1/3 van de geregistreerde personenauto's in 2024 was een full-EV ([Kerncijfers Auto en Mobiliteit 2025 - Wagenpark telt steeds meer elektrische en hybride voertuigen | RAI Vereniging](#)) en in 2024 was ca. 1/3 van de OV-bussen zero-emissie ([CROW | Poster milieuprestatie 2024: 32% ov-bussen is zero-emissie](#))

3. Welke maatregelen kunnen worden genomen om de brandrisico's te beheersen.
Denk hierbij aan ontwerpeisen van materieel en (laad)installatie, ruimtelijke indeling (bij laden en stallen), (veiligheids)organisatie, blusvoorzieningen e.d.
- > Met betrekking tot incidentbestrijding (incidentmanagement):
 4. Hoe ziet incidentbestrijding er uit?
 5. Hoe moet berging van dit materieel geschieden (logistiek)?
 6. Hoe kan men verbrand materieel langdurig veilig stellen?

In aanvulling hierop stelt het onderzoek zich ten doel achtergrondinformatie te verschaffen ten aanzien van wet- en regelgeving met betrekking tot zero-emissiematerieel en de werking en veiligheidsrisico's van de waterstof- en batterijsystemen.

Afbakening

De studie heeft betrekking op de volgende (in het algemeen zware) types machines, werktuigen of voertuigen ("materieel"):

- > OEM-materieel²: voer- en werktuigen met batterij elektrische aandrijving (BEV)³, waterstof-elektrische aandrijving middels een brandstofcel (FCEV), en aandrijving middels een waterstof-verbrandingsmotor (H₂-ICE). Andere aandrijfvormen vallen buiten beschouwing.
- > Voor logistiek: voertuigen voor op de openbare weg, waarbij het voertuig een kentekenplicht heeft en in de RDW-categorie N1 (bestelwagen), N2 of N3 (vrachtwagen) valt. Andere (bijzondere) voertuigen, voor bijvoorbeeld exceptioneel transport vallen buiten beschouwing.
- > Voor bouw: mobiele machines, voertuigen en werktuigen die in de bouw worden ingezet en beschikken over een batterijvermogen van ten minste 8 kW. Ook mobiele Energie Opslag Systemen (EOS'en) vallen binnen de reikwijdte van het onderzoek.

Leeswijzer

Na een beschrijving van de onderzoeksmethode bestaat voorliggend document uit drie delen (verdeeld over de hoofdtukken 1 t/m 11), conclusies (hoofdstuk 12) en een literatuurlijst. De drie delen zijn als volgt opgebouwd:

- > Deel I (hoofdstuk 1 t/m 3): Algemeen
Hierin worden algemene aspecten relevant voor zowel bouw als logistiek behandeld. In hoofdstuk 1 wordt de wet- en regelgeving op zowel nationaal als Europees en internationaal niveau behandeld.
In hoofdstuk 2 wordt dieper ingegaan op de basisprincipes, werking en risico's verbonden aan het gebruik van lithium-ion⁴ batterijsystemen. Ook wordt kort aandacht besteed aan recente ontwikkelingen (innovaties)
Theorie, werking en veiligheid van waterstofsysteem wordt beschreven in hoofdstuk 3.
- > Deel II (hoofdstuk 4 t/m 70): Logistiek
In dit deel worden voor de sector logistiek de zes onderzoeksvragen beantwoord. In

² Original Equipment Manufacturer (OEM); af-fabriek geproduceerde logistieke en bouwvoertuigen.

³ De termen BEV en FCEV zullen hier voor alle materieel worden gehanteerd: machines, voertuigen, werktuigen.

⁴ Op dit moment worden vrijwel uitsluitend batterijen van het type lithium-ion toegepast.

hoofdstuk 4 wordt een systeembeschrijving gegeven van zero-emissiematerieel in de logistieke sector, aangevuld met ongevallencasuïstiek. In hoofdstuk 5 wordt aan de hand van drie voorbeeld-incidentscenario's antwoord gegeven op de vragen 1 en 2 uit de doelstelling ten aanzien van de mogelijke effecten en de impact op de omgeving. Hoofdstuk 6 bevat maatregelen om de brandveiligheidsrisico's te beheersen (vraag 3). Incidentmanagement (vragen 4 t/m 6) wordt in hoofdstuk 70 behandeld.

> Deel III (hoofdstuk 8 t/m 11): Bouw

In dit deel worden op dezelfde wijze als voor logistiek voor de sector bouw de zes onderzoeksvragen beantwoord. Hoofdstuk 8 biedt een systeembeschrijving van zero-emissiematerieel in de bouwsector, eveneens aangevuld met ongevallencasuïstiek. Hoofdstuk 9 bevat drie incidentscenario's gericht op beantwoording van de vragen 1 en 2 voor de sector bouw. Hoofdstuk 10 bevat maatregelen om de brandveiligheidsrisico's op bouwlocaties te beheersen (vraag 3) en incidentmanagement (vragen 4 en 6) wordt in hoofdstuk 11 behandeld.

Onderzoeksmethode

Deel I: Algemeen

Als uitgangspunt voor hoofdstuk 1 over wet- en regelgeving zijn diverse nationale en internationale richtlijnen en handreikingen bestudeerd. Op basis hiervan is een overzicht opgesteld van wet- en regelgeving die van toepassing is op het gebruik van zero-emissievoertuigen, waterstofinstallaties en energieopslagsystemen in de sectoren bouw en logistiek. Hiervoor zijn zowel relevante wetteksten geraadpleegd als aanvullende informatie uit online bronnen, zoals de websites van toezichthouders, de Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS) en het Nederlands Normalisatie-instituut (NEN). De onderstaande documenten vormden de kern van de literatuurstudie en dienden als basis voor het vinden en selecteren van relevante juridische kaders:

- > Ontwerprichtlijnen brandveiligheid voor stallingen zero-emissiebussen (CROW, 2022b);
- > Inventarisatie veiligheidsaspecten zero-emissiebussen (CROW, 2022a);
- > Veiligheid elektrisch rijden en laden in logistiek en bouw (DNV, 2022);
- > Veiligheidseisen voor EV-laadpleinen bij transportondernemingen (Reinders et al., 2024);
- > Landelijke richtlijn bouw- en sloopveiligheid (Vereniging BWT, 2023);
- > Richtlijn Veilige Inzet Elektrisch Materieel (KOMAT, 2024);
- > Veiligheid rondom emissieloos materieel in de bouw en bouwtransport (Arcadis, 2023);
- > Handreiking Veilig Ombouwen (BMWV, 2022).

Voor de literatuurstudie naar algemene veiligheidsrisico's van batterijsystemen (hoofdstuk 2) zijn eerdere door het NIPV uitgevoerde studies gebruikt, evenals aanvullende (wetenschappelijke) publicaties. Deze publicaties zijn verkregen via zoekopdrachten in de databases Elsevier – Science Direct, Wiley en Google Scholar. Hierbij zijn voor de periode 2021 tot en met 2024 de volgende trefwoorden gebruikt: *lithium-ion incident suppression*, *lithium-ion incident management*, *lithium-ion fire suppression*, *lithium-ion risk analysis*, *lithium-ion battery car crash recovery*, *lithium-ion battery accident*, *electric vehicle emergency response* en *safe storage of electric vehicles*. Via referenties werd de zogeheten sneeuwbalmethode toegepast waarmee andere relevante artikelen werden bestudeerd. Voor de literatuurstudie naar veiligheidsrisico's van waterstof (hoofdstuk 3) is dezelfde aanpak toegepast als bij batterijen. Er is daarbij gebruik gemaakt van eerder door het NIPV verzamelde kennis, aangevuld met relevante publicaties en rapportages over theoretische achtergronden, gevaren en risicobeheersing van waterstofsysteem.

Tussentijdse resultaten van de literatuurstudies zijn besproken en afgestemd met begeleidingscommissies voor logistiek en bouw. Deze commissies bestonden uit vertegenwoordigers van de overheid, de brandweer, en van verschillende bedrijfstakken en brancheorganisaties (zie Bijlage 3).

Deel II: Logistiek

Voor de systeembeschrijving voor de logistieke sector in hoofdstuk 4 is op basis van literatuur en in samenspraak met de begeleidingscommissie logistiek een indeling gemaakt naar voertuigcategorieën (N1, N2, N3) en type aandrijving (batterij-elektrisch of waterstof).

Voor het onderzoek naar ongevallencasuïstiek voor zero-emissievoertuigen is van onderstaande bronnen gebruik gemaakt:

- > Mediaberichten;
- > Incidentendatabase voor incidenten met alternatief aangedreven voertuigen (AAVs) van het NIPV;⁵
- > Incidentendatabase van EV FireSafe;⁶
- > Meldingen en informatie van veiligheidsregio's die betrokken zijn geweest bij relevante incidenten.

Er zijn twee incidenten opgenomen met voor dit onderzoek relevant materieel, waarbij het batterijpakket of de waterstofinstallatie betrokken was bij het incident.

De beperkte beschikbaarheid van goed gedocumenteerde incidenten heeft ertoe geleid dat, in overleg met de begeleidingscommissie logistiek, drie (min of meer fictieve) voorbeeldscenario's zijn opgesteld waarvan de effecten op de omgeving zijn uitgewerkt. Van belang hierbij waren representativiteit voor de praktijk, de relevantie voor brandveiligheid en incidentbestrijding, en de beschikbaarheid van aanvullende gegevens, zoals brandexperimenten of rescue sheets van fabrikanten. Bij de uitwerking (in de hoofdstukken 5 & 9) is gebruik gemaakt van het softwareprogramma EFFECTS (versie 12.5) en een door NIPV ontwikkeld model (Brans & Reinders, 2024).

In hoofdstuk 6 worden de maatregelen beschreven om de brandveiligheidsrisico's te beheersen en in hoofdstuk 0 wordt ingegaan op incidentbestrijding / -management. Hierbij is gebruik gemaakt van binnen- en buitenlandse literatuur, bestaande richtlijnen en instructies van fabrikanten.

Deel III: Bouw

In hoofdstuk 8 wordt een systeembeschrijving gegeven van het zero-emissiematerieel dat momenteel wordt gebuikt in de bouw of in ontwikkeling is; dit op basis van literatuur aangevuld met gegevens verkregen uit gesprekken met leden van de begeleidingscommissie bouw en experts uit de sector.

Het onderzoek naar ongevallencasuïstiek voor zero-emissiematerieel binnen de bouw is op dezelfde wijze uitgevoerd als bij logistiek: analyse van mediaberichtgeving, eerder genoemde incidentendatabases en informatie verkregen via veiligheidsregio's. Selectiecriteria hierbij waren dat het incident zich moest hebben voorgedaan op een bouwlocatie en dat het batterijpakket of de waterstofinstallatie erbij betrokken moesten zijn. Dit leverde één incident op dat in hoofdstuk 8 wordt beschreven.

⁵ <https://nipv.nl/database-incidenten-met-alternatief-aangedreven-voertuigen/>

⁶ [02.1 EV battery fire data | EV Fire Safe](#)

Ook hier was beschikbaarheid van goed gedocumenteerde incidenten te beperkt om geschikte voorbeeldcases te selecteren voor verdere uitwerking en zijn, in overleg met de begeleidingscommissie bouw, drie (min of meer fictieve) incidentscenario's opgesteld die door hen als relevant en leerzaam voor de praktijk werden beschouwd. Daarbij is ook gekeken naar variatie in omgevingscondities (in pandig, stedelijk gebied, nabij woningen) en de beschikbaarheid van technische informatie voor verdere analyse.

Ook hier is beschikbare kennis over incidentbestrijding verwerkt, uitgesplitst naar de verschillende fasen van een incident en is gebruikgemaakt van bestaande (generieke) handelingsperspectieven en documentatie van fabrikanten uit binnen- en buitenland.

Deel I - Algemeen

1 Wet- en regelgeving

1.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de regelgeving uitgewerkt die betrekking heeft op de alternatief (waterstof, batterij-elektrisch) aangedreven voertuigen en werktuigen (hierna kortweg aangegeven met AAVs) binnen de scope van dit onderzoek. In het algemeen kan worden opgemerkt dat veel van de wet- en regelgeving die hierop van toepassing is niet specifiek gericht is op alternatieve voertuigen, maar ook geldt voor de ‘traditionele’ benzine en diesel voer- en werktuigen. Regels over bijvoorbeeld arbeidsveiligheid zijn vaak van toepassing op zowel AAVs als verbrandingsvoertuigen. In het overzicht hieronder zullen met name voorschriften worden genoemd die een relatie hebben met omgevingsveiligheidsaspecten van AAVs en/of de hierin aanwezige energiesystemen.

Eerst wordt internationale en Europese wet- en regelgeving besproken. Deze is ook in Nederland van toepassing en wordt vaak ‘vertaald’ in Nederlandse wetten, die weer verder kunnen zijn uitgewerkt in besluiten. In het stuk “Nederlandse regelgeving” wordt ingegaan op Nederlandse regelgeving met relevante veiligheidsaspecten voor AAVs of daaraan gerelateerde activiteiten.

Ten slotte worden enkele normen en richtlijnen benoemd. Deze bevatten vaak technische informatie, opgesteld door (inter)nationale instituten als CEN/CENELEC, ISO en NEN. Hoewel ze in het algemeen geen wettelijke basis hebben, wordt via wetgeving toepassing vaak vereist⁷.

1.2 Europese wet- en regelgeving

Een groot gedeelte van de wet- en regelgeving in Nederland (en andere landen binnen Europa) is gebaseerd op Europese verdragen die door lidstaten zijn ondertekend. Een verordening (Engels: ‘Regulation’) is een bindende rechtshandeling die in de hele EU van toepassing is. Een richtlijn (Engels: ‘Directive’) is een rechtshandeling die een bepaald doel vastlegt dat de EU-landen moeten bereiken. Zij mogen echter zelf de wetgeving vaststellen om dat doel te bereiken. Een EU-besluit (Engels: ‘Decision’) is bindend voor degene tot wie het gericht is (een EU-land of bedrijf) en is rechtstreeks toepasselijk (Europese Commissie, z.d.).

1.2.1 Machinerichtlijn

De Europese [Richtlijn 2006/42/EG](#), of “machinerichtlijn”, waarborgt de veiligheid van machines en voertuigen. Een machine is volgens de richtlijn één geheel van met elkaar verbonden onderdelen, waarvan tenminste een bewegelijk is. De verordening is derhalve ook voor AAV geldig. De richtlijn regelt dat machines zo moeten worden ontworpen en geproduceerd dat zij aan fundamentele veiligheidseisen voldoen. Er wordt bijvoorbeeld

⁷ Zie bijvoorbeeld [Vrij beschikbare normen](#)

geregeld dat de fabrikant een risicobeoordeling moet uitvoeren en een gebruiksaanwijzing aanwezig moet zijn. De conformiteit met de richtlijn moet worden aangetoond met een EG-verklaring.

Vanaf januari 2027 wordt de actuele versie van de machinerichtlijn ingetrokken en vervangen door de machineverordening [\(EU\) 2023/1230](#), die vervolgens voor alle EU lidstaten verplichtend is (NEN, 2024).

1.2.2 EMC richtlijn

De EMC richtlijn ([Richtlijn 2014/30/EU](#)) stelt eisen voor het waarborgen van de elektromagnetische compatibiliteit (EMC). Als er meerdere elektrische apparaten naast elkaar worden gebruikt zorgt deze eisen dat de uitrusting geen storingen bij andere elektrische apparaten veroorzaakt of zelf door storingen wordt beïnvloed. Dat betekent dat elektromagnetische emissies van uitrusting (de onderdelen van elektrische voertuigen en laadpleinen zoals kabels, batterijen, omvormers) begrenst moeten worden. Daarnaast moet de immuniteit van de uitrusting tegen elektromagnetische velden worden vastgesteld. De conformiteit van alle apparaten moet conform de richtlijn aangetoond worden.

1.2.3 Pressure Equipment Directive

De richtlijn drukapparatuur [2014/68/EU](#) (pressure equipment directive, PED) bevat de veiligheidseisen waaraan de fabrikant van een drukapparatuur, zoals waterstofinstallaties (met een druk van maximaal 0.5 bar) moet voldoen. De richtlijn is echter niet geldig voor vervoerbare drukapparatuur, zoals gasflessen, drukhouders, tanks of MEGC's (multiple element gas containers). Daarvoor geldt richtlijn [2010/35/EU](#) (TPED), welke strengere eisen stelt omdat er grotere risico's optreden bij het vervoer van drukapparatuur. Als de vervoerbare drukapparatuur voor het vervoer van gevaarlijke stoffen wordt gebruikt, dan moet ook aan de ADR-regelgeving worden voldaan (zie paragraaf 1.2.5).

Beide richtlijnen schrijven keuring van de installatie en regelmatige herkeuring voor. Verder moet de fabrikant van de apparatuur een risicoanalyse uitvoeren, waarbij gevaren worden geïdentificeerd en beheersmaatregelen moeten worden getroffen. De richtlijnen vormen de basis voor de Nederlandse Warenwetbesluit drukapparatuur (zie paragraaf Warenwet). PED is in PGS 35 (zie paragraaf Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen) aangewezen.

1.2.4 ATEX regelgeving

ATEX staat voor het Franse "Atmosphères Explosibles" en betreft de regelgeving voor werkplekken waar een explosieve atmosfeer kan ontstaan en de apparatuur die op deze werkplekken wordt gebruikt. Explosieve atmosferen kunnen ontstaan door het vrijkomen van een mengsel van brandbare stoffen zoals gas, damp of nevel in de lucht, in zodanige concentratie dat maatregelen noodzakelijk zijn om explosiegevaar te voorkomen.

ATEX 114 ([Richtlijn 2014/34/EU](#)) is van toepassing op apparatuur die in explosieve omgeving wordt gebruikt. Deze richtlijn is in Nederland geïmplementeerd via het **Warenwetbesluit** explosief materieel. Specifieke technische eisen voor apparatuur zijn vastgelegd in normen zoals de **NEN-EN-IEC 60079**. De eisen zijn bedoeld om te waarborgen dat apparatuur niet als ontstekingsbron fungeert, bijvoorbeeld in het geval van een ongewenste lekkage van waterstof.

ATEX 153 ([Richtlijn 1999/92/EG](#)) richt zich op de bescherming van werknemers en stelt minimumeisen voor een veilige werkomgeving in explosiegevaarlijke omgevingen. Deze richtlijn is in Nederland opgenomen in het **Arbeidsomstandighedenbesluit** (bijv. Art. 3.5). Werkgevers moeten technische en organisatorische maatregelen nemen, zoals het waarborgen van goede ventilatie, het gebruik van explosieveilige apparatuur en het voorkomen van ontstekingsbronnen, om de risico's voor werknemers als gevolg van explosiegevaar te minimaliseren

1.2.5 ADR

De [ADR](#) (Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route) is de belangrijkste internationale richtlijn die het vervoer van gevaarlijke goederen over de weg reguleert. Op basis van stoffeigenschappen worden stoffen in ADR-klassen ingedeeld. Daaraan hangen eisen over de criteria voor de vervoerswaarden, de eisen aan verpakkingen (zoals tanks) en de procedures voor verzendingen. Er worden waarschuwingsetikettering zoals UN (United Nations) nummers aangewezen voor elk gevaarlijke stof (Koning, 2023).

- > Transport van lithium-houdende energiedragers valt onder ADR-klasse 9 en is geregeld in paragraaf 2.2.9.1.7. Transporteenheden die lithium-ion batterijen bevatten dragen nummer UN 3536.
- > Transport van waterstof valt onder ADR-klasse 2. Gasvormig waterstof heeft het kenmerk UN 1049 en vloeibare waterstof UN 1966.
- > Het transport van AAV's is niet in de ADR wetgeving opgenomen (bijzondere bepaling 666).

In Europa zijn de ADR regels opgenomen in de **EU Richtlijn 2008/68/EG**. Deze EU-richtlijn regelt het vervoer van gevaarlijke goederen over weg, spoor en binnenwateren. Het biedt een raamwerk voor de veiligheid van het transport van gevaarlijke stoffen. In Nederland zijn de regels geïmplementeerd in de **Wet Vervoer Gevaarlijke Stoffen** (Wvgs) en de **Regeling Vervoer over land van gevaarlijke stoffen** (Vlg).

Sinds versie 2023 van het ADR worden elektrisch aangedreven voertuigen toegestaan voor het transport van gevaarlijke stoffen, voor zover het niet (bulk)vervoer van brandbare vloeistoffen, brandbare gassen, peroxides (FL-voertuigen) of explosieven betreft.

1.2.6 Kaderverordening

De zogenoemde "kaderverordening" [Verordening - 2018/858](#) reguleert de goedkeuring en het markttoezicht van motorvoertuigen en aanhangwagens, inclusief systemen, onderdelen en technische eenheden die voor dergelijke voertuigen zijn bestemd. Dit reglement beschrijft het volledige proces van typegoedkeuring, van het ontwerp van voertuigen tot de toelating op de Europese markt en verwijst naar onderliggende technische voorschriften, onder andere:

- > UNECE R100 omvat veiligheidseisen van elektrisch materieel
- > UNECE-R10 bevat regels voor de elektromagnetische compatibiliteit
- > Verordening (EG) nr. 661/2009 elektrische veiligheid
- > [Verordening \(EG\) nr. 79/2009](#) typegoedkeuring van motorvoertuigen op waterstof.

In Nederland is de RDW (Rijksdienst voor het Wegverkeer) verantwoordelijk voor de toelating, registratie en controle van voertuigen (meer hierover in sectie 1.3.5).

1.3 Nederlandse wet- en regelgeving

1.3.1 Omgevingswet en bijbehorende Besluiten

De **Omgevingswet** vormt sinds 2024 de wettelijke basis voor het reguleren van de fysieke leefomgeving. Deze wet legt onder andere regels vast voor de bewoonbaarheid van het land en het beschermen en verbeteren van het leefmilieu. De Omgevingswet stuurt verschillende besluiten aan, waaronder het Omgevingsbesluit, het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl), het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal), en het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl). Voor dit onderzoek zijn vooral het Bal en het Bbl relevant en zijn nader uitgewerkt.

De **Omgevingsregeling** biedt een praktische uitwerking van een aantal regels uit het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl) en het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal). Het **Omgevingsbesluit** regelt welk bestuursorgaan bevoegd gezag voor een bepaalde zaak. Het **Besluit kwaliteit leefomgeving** is vooral belangrijk voor de bestuurder van bijvoorbeeld een gemeente. In dit besluit worden de bevoegdheden van het bevoegd gezag verder uitgewerkt.

Het **Omgevingsplan** bevat lokale regels die een gemeente stelt over de fysieke leefomgeving. Sinds de invoering van de **Omgevingswet** zijn alle voormalige bestemmingsplannen automatisch omgevingsplan geworden. Veel gemeenten zijn nog bezig met de verdere doorontwikkeling en invulling van het omgevingsplan. Een omgevingsplan kan ook bepalingen bevatten met betrekking tot brandveiligheidsvoorzieningen in de omgeving, zoals de beschikbaarheid van bluswater en de bereikbaarheid voor hulpdiensten.

Het **Besluit bouwwerken leefomgeving** bevat technische voorschriften waaraan alle bouwwerken in Nederland moeten voldoen. Een deel van deze voorschriften bestaat uit brandveiligheidsvoorschriften. De fundamentele doelen van de brandveiligheidsvoorschriften zijn het beperken van de kans op slachtoffers en het beperken van de kans op branduitbreiding naar andere percelen.

In het Bbl in Afdeling 3.4 en 4.4 (Duurzaamheid in bestaande bouw en nieuwbouw) staan regels voor oplaadpunten voor elektrische voertuigen. Dit is met name relevant voor voertuigstallingen. Er wordt onder meer vereist dat bij de toegang van een gebouw kenbaar wordt gemaakt waar zich de laadpunten bevinden en dat er een centrale afschakeling wordt geïnstalleerd.

Het Bbl bevat regels voor bouw- en sloopactiviteiten (hoofdstuk 7). In artikel 7.5c staat dat bij het aanvragen van een vergunning voor bouw- of sloopwerkzaamheden, of bij het doen van een bouw- of sloopmelding, ook een risicomatrix moet worden ingediend bij de gemeente. Deze matrix laat zien welke veiligheidsrisico's in de omgeving zijn herkend. De veiligheidsrisico's rondom het gebruik van zero-emissievoer- en werktuigen op de bouwplaats moet hierin mee genomen worden. Als er een groter aantal aan aandachtspunten voor de veiligheid (meer dan 12) bestaan, moet een veiligheidsplan worden aangeleverd. Daarin worden maatregelen vast gelegd om de veiligheid op de bouwplaats en de omgeving te waarborgen. Een veiligheidscoördinator moet worden benoemd die verantwoordelijk is voor het implementeren van deze maatregelen. Het Bbl schrijft niet voor wat in het veiligheidsplan moet staan, echter zijn in de **Landelijke richtlijn bouw- en sloopveiligheid** richtlijnen aangegeven. Het veiligheidsplan omvat onder andere een weergave van de bouwplaats in een tekening, een inschatting van het

benodigde terrein voor de geplande bouwwerkzaamheden, gebruik van machines en benodigde parkeerplekken. Veiligheidsrisico's en beheersmaatregelen moeten ook in het veiligheidsplan worden genoemd. Voorbeelden van maatregelen zijn:

- > Voorkomen van aanrijdgevaar
- > Onderzoek naar stabiele ondergrond bij gebruik van machines
- > Waarborgen van de toegang voor hulpverlening,
- > Toegankelijkheid van vluchtwegen en verzamelplaatsen
- > Beschikbaarheid van blusvoorzieningen
- > in stand houden opstelplaatsen van blus- en hulpverleningsvoertuigen

Het gebruik van AAV's op bouwplaatsen wordt in de richtlijn niet expliciet genoemd, maar is wel van toepassing.

Het **Besluit activiteiten leefomgeving** bevat regels waaraan burgers, bedrijven en overheden zich moeten houden wanneer zij activiteiten uitvoeren die gericht zijn op (ver)bouwen, slopen en het gebruik van de fysieke leefomgeving. Dit besluit bevat regels voor milieubelastende activiteiten en bepaalde bedrijfstakken, en bepaalt wat als milieubelastende activiteit (mba) geldt. Paragraaf 3.2.9 van het Bal geeft aan onder welke omstandigheden het opslaan van gevaarlijke stoffen als milieubelastende activiteit wordt aangewezen. Daarnaast stuurt het de Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS) aan.

- > Het opslaan van lithium-houdende batterijen en het exploiteren van een energieopslagsysteem zijn (nog) niet in het Bal aangewezen als milieubelastende activiteiten. De algemene regels van het Bal zullen waarschijnlijk vanaf 2025 verwijzen naar zowel PGS 37-1 als PGS 37-2.
- > Tanken en stationaire opslag van gasvormig waterstof is in het Bal als milieubelastende activiteit aangewezen (art. 4.38). Voor de regels voor waarborging van de externe veiligheid wordt naar PGS 35 verwezen (art 4.489). De reikwijdte van PGS 35 betreft de opslag van waterstof, de technische installatie en de tankzuil. Het gebruik van waterstofvoertuigen en -werktuigen vallen buiten deze reikwijdte.

1.3.2 Arbowetgeving

De [Arbowet](#), het [Arbobesluit](#) en de Arboregeling vormen samen het wettelijke kader voor gezonde en veilige arbeidsomstandigheden in Nederland. Het doel van deze regelgeving is het voorkomen van slachtoffers en onveilige situaties op de werkplek. De werkgever is verantwoordelijk voor het bieden van veilige en gezonde arbeidsomstandigheden, terwijl de werknemer verplicht is om werkzaamheden veilig uit te voeren. Deze wetgeving is complementair aan het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl), dat regels stelt voor de veiligheid van gebouwen en bouwwerken. Bouwplaatsen en logistiekterreinen gelden naar volgens de Arbowet als arbeidsplaatsen.

Hoewel de Arbowet geen specifieke eisen stelt aan waterstof- en batterij-aangedreven voertuigen, is de algemene regelgeving van toepassing. Dit betekent dat de werkgever een algemene zorgplicht heeft, en bijvoorbeeld verantwoordelijk is voor het geven van voorlichting en opleiding over veilig werken met AAV.

Ook verplicht de Arbowet werkgevers om een Risico-Inventarisatie en -Evaluatie (RI&E) op te stellen, waarin alle risico's op de werkvloer worden geïdentificeerd en beheersmaatregelen worden voorgesteld. Daarbij hoort onder andere dat arbeidsmiddelen, waaronder voertuigen, regelmatig onderhoud en inspectie moeten ondergaan, en dat er

noodprocedures beschikbaar zijn in geval van incidenten. De ATEX regels vormen de basis voor de regels rondom het werken in potentieel explosieve atmosferen, zoals bij het werken met waterstof.

De Nederlandse Arbeidsinspectie houdt toezicht op de naleving van de Arbowet.

1.3.3 Warenwet

Alle consumentenproducten die in Nederland geproduceerd, bereid of verhandeld worden moeten aan de Warenwet voldoen. De Warenwet zorgt ervoor dat producten die in Nederland op de markt worden gebracht veilig zijn voor consumenten en voldoen aan gestelde eisen. De Warenwet bevat een aantal besluiten voor verschillende categorieën van producten. Bepaalde voertuigonderdelen, zoals elektrische installaties, vallen onder het [Warenwet besluit machines](#). De eisen aan producten in het besluit stammen van de Europese Machinerichtlijn. Waterstofinstallaties moeten aan het [Warenwetbesluit drukapparatuur](#) voldoen, welke in PGS 35 mee wordt genomen. Voor vervoerbare waterstofinstallaties geldt de [Regeling vervoerbare drukapparatuur](#) (Inspectie Leefomgeving en Transport, z.d.).

1.3.4 Wet vervoer gevaarlijke stoffen (Wvgs)

Deze wet is bedoeld om de veiligheid van mensen en dieren te waarborgen tijdens het transport van gevaarlijke stoffen over de weg, per spoor en via binnenwateren. Het is van toepassing op onder andere het transport van energieopslagsystemen en waterstof. Hoofdstuk III behandelt het Basisnet, terwijl Hoofdstuk IV ingaat op de routing van gevaarlijke stoffen. Artikel 47 verplicht het melden van ongevallen met gevaarlijke stoffen bij de Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT). Het **Besluit vervoer gevaarlijke stoffen** geeft gedetailleerde regels over de eisen voor vervoer, verpakking en de benodigde documentatie. De **Regeling vervoer over land van gevaarlijke stoffen** (Vlg) stelt specifieke regels vast voor het transport van gevaarlijke stoffen over de weg in Nederland. Deze regels omvatten onder andere de naleving van het Europese ADR-verdrag, het vervoer van gevaarlijke stoffen door tunnels, de routekeuze voor gevaarlijke stoffen, en de voorschriften voor het rijden onder ongunstige weersomstandigheden.

1.3.5 Typegoedkeuring Voertuigen

De **RDW** is verantwoordelijk voor de toelating, registratie en controle van voertuigen in Nederland, waaronder zero-emissievoertuigen aangedreven door batterijen en waterstof. De wettelijke kaders die deze verantwoordelijkheid regelen, zijn vastgelegd in de Wegenverkeerswet 1994, het Besluit voertuigen, en het Reglement voertuigen: De **Wegenverkeerswet** vormt de basis van alle regels voor het werkverkeer in Nederland en beschrijft de wettelijke kaders rondom verkeersveiligheid, voertuigregistratie en toelating op de weg. De RDW heeft de taak om toezicht te houden op de naleving van deze wet en het uitvoeren van de daarin beschreven controles en certificeringen. Dat omvat onder andere typegoedkeuring, registratie en handhaving van voertuigveiligheid. Het **Besluit voertuigen** stelt specifieke technische eisen aan voertuigen die op de weg worden toegelaten. Voor voertuigen met waterstof- en batterijen stelt dit besluit eisen met betrekking tot de veiligheid van de installatie, de opslag van brandstof, en de milieuprestaties. Het **Regeling voertuigen** bouwt voort op het Besluit voertuigen en bevat gedetailleerde voorschriften voor de technische staat en de werking van voertuigen, inclusief voertuigen met alternatieve aandrijving. Waterstofvoertuigen moeten voldoen aan eisen

omtrent de drukvaten waarin waterstof wordt opgeslagen, de veiligheid van het distributiesysteem in het voertuig, en de crashveiligheid. Voertuigen met batterijen moeten voldoen aan normen voor brandveiligheid en thermische stabiliteit en ze moeten op de juiste manier zijn geïnstalleerd om risico's zoals oververhitting te voorkomen.

Sinds 2021 moeten bouwvoertuigen die de weg op gaan geregistreerd zijn bij de RDW en een kenteken dragen (Rijksoverheid, z.d.) Bij het veranderen van brandstof van voertuigen met kenteken is een voertuig herkeuringsplichtig en gestelde veiligheidseisen worden opnieuw door de RDW beoordeelt. Echter zijn er werkvoertuigen die niet de weg op gaan (Non-Road Mobile Machinery, NRMM), welke geen registratieplicht hebben en ook niet door de RDW goedgekeurd moeten worden. Dit kan betekenen dat elektrificeerde voertuigen (zowel nieuw als omgebouwd) niet door een externe partij gecontroleerd worden (Arcadis, 2023). BMWT heeft de “[Handreiking Veilig Ombouwen](#)” opgesteld, die aan eigenaren, ombouwers, fabrikanten, verhuurders en gebruikers van omgebouwde voertuigen uitlegt welke acties nodig zijn om de veiligheid van de voertuigen aan te tonen. BMWT voert keuringen uit in lijn met de Arbowet, maar gaat niet over de initiële toelating van werkvoertuigen.

1.3.6 Laadpleinen

Laadpleinen (die aan het elektriciteitsnet zijn aangesloten) moeten voldoen aan de [Netcode elektriciteit](#). De code zorgt ervoor dat elektriciteit beschikbaar, betrouwbaar en betaalbaar blijft. De Netcode, die aangewezen wordt in de Elektriciteitswet⁸ is wettelijk vastgelegd in de [Richtlijn 2009/72/EG](#). De Netcode vereist dat de netbeheerder bij onveilige situaties en storingen rondom een laadpaal ingeschakeld moet worden. De netbeheerder heeft de plicht binnen 4 uur na melding te verhelpen. In de [Verordening \(EG\) 714/2009](#) staat aan welke eisen nieuwe verbruiks-, opslag- en productie-eenheden moeten voldoen en wat de voorschriften zijn voor het koppelen van productie- en opslaginstallaties aan elektriciteitsnetwerken en voor het aansluiten van klanten op de elektriciteitsnetwerken (Stedin, n.d.). Autoriteit Consument & Markt ([ACM](#)) houdt toezicht op de netbeheerders.

Het Nationaal Kennisplatform Laadinfrastructuur (NKL) heeft twee “Basissets” opgesteld voor [AC](#)- en [DC](#)-laadinfrastructuur. Deze zijn niet wettelijk vast gelegd, maar leveren een goede richtlijn voor het veilige inrichten van een laadplein. Via privaatrechtelijke contracten worden deze wel vaak opgelegd binnen concessies. Voor de brandveiligheid wordt in de Basisset AC-laadinfrastructuur volgende aanbeveling gedaan: “Bij installatie van meerdere laadpunten in een afgesloten ruimte, wordt in samenwerking met de gebouweigenaar of exploitant gezorgd voor een voorziening waarmee de laadpunten centraal en tegelijkertijd kunnen worden uitgeschakeld in geval van calamiteiten. Bij de toegang van de garage wordt kenbaar gemaakt hoe die voorziening is uitgevoerd en waar de laadvoorzieningen van elektrische voertuigen zich bevinden.”

⁸ Er is een [wetsvoorstel](#), waarbij de huidige Gaswet en Elektriciteitswet worden vervangen door in een nieuwe Energiewet.

1.4 Normen en richtlijnen

1.4.1 Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (PGS)

De PGS is een in Nederland geldige serie van richtlijnen over opslag, transport en gebruik van gevaarlijke stoffen. Zij zijn zowel bedoelt voor bedrijven die activiteiten met gevaarlijke stoffen uitvoeren, als overheden die belast zijn met de toezicht en de vergunningverlening aan deze bedrijven. Aan de hand van ongevalsscenario's worden bepaalde veiligheidsdoelen geformuleerd. Er worden bijhorende maatregelen beschreven om de veiligheid op de werkvloer, omgevingsveiligheid en brandveiligheid te waarborgen (Stoffen, n.d.). Er bestaan PGS'en voor zowel lithium-houdende energieopslagsystemen (PGS 37-1 en -2) als voor de gebruik van waterstof (PGS 35 en PGS 36). Specifiek voor batterijen

PGS 37-1 Lithiumhoudende energiedragers: energieopslagsystemen (EOS)

[PGS 37-1](#) is een richtlijn voor de veilige opslag van elektriciteit in EOS'en. Deze richtlijn geeft aan hoe je op een veilige manier omgaat met grote batterijen die energie opslaan en elektriciteit leveren. Het gaat dus om grote batterijen (> 20 KWh) die als stationair energiereservoir kunnen worden gebruikt en niet om batterijen in voertuigen. De richtlijn bevat echter aanbevelingen die ook voor elektrische voertuigen nuttig kunnen zijn. Het bevat onder andere eisen voor een jaarlijkse controle van het EOS (elektrische installatie, visueel, klimaatinstallatie, brandblusinstallatie, omvormers, transformatoren), voorschriften voor onderhoud van EOS en bevat noodprocedures bij ongevallen.

In het Bal zullen het opslaan van lithium-houdende batterijen en het exploiteren van een energieopslagsysteem worden aangemerkt als milieubelastende activiteiten. Dat betekent dat zowel PGS 37-1 als PGS 37-2 waarschijnlijk in de loop van het jaar 2025 worden aangewezen in het Bal.

PGS 37-2 Lithiumhoudende energiedragers: Opslag

[PGS 37-2](#) richt zich op de opslag van lithiumhoudende energiedragers. In hoofdstuk 1.2 is de toepassingsbereik van de PGS uitgelegd. Of een opslag onder de PGS valt is afhankelijk van het gewicht van de opgeslagen batterijen. De richtlijn gaat over losse lithiumion-batterij's die als onderdeel van een product worden gebruikt. Daarbij horen bijvoorbeeld batterijen voor laptops, e-bikes, elektrische en hybride voertuigen. De richtlijn richt zich ook op voertuigstallingen die bedoeld zijn voor elektrische voertuigen. Zowel voertuigen die worden gestald vallen onder deze PGS als voertuigen die worden opgeladen. Voertuigen die in gebruik zijn vallen niet onder deze PGS.

PGS 37-2 wordt waarschijnlijk, net zoals PGS 37-1, in de loop van 2025 in het Bal aangewezen.

[PGS 35](#) Waterstofinstallaties voor het afleveren van waterstof aan voertuigen en werktuigen

PGS-35 is van toepassing op waterstofinstallaties voor het afleveren van gasvormige waterstof aan voertuigen of werktuigen. Het systeem is begrensd tot het tankende voertuig en de installatie voor aanlevering van waterstof. De nominale druk van de brandstoftank van het voertuig is maximaal 700 bar. De waterstoftankstations kunnen mobiel of stationair zijn. De richtlijn is aangewezen in paragraaf 4.38 in het Bal (Tanken en opslaan van waterstof).

[PGS 36](#) Waterstof - Stallen, onderhouden en repareren van motorvoertuigen

PGS 36 bevat regels voor bedrijfsmatig stallen van voertuigen en werktuigen die door waterstof worden aangedreven (gasvormig en vloeibaar). Het gaat erbij expliciet om het

stallen van voertuigen en niet om het *parkeren* van voertuigen door particulieren. De PGS 36 is nog niet aangewezen in het wet.

1.4.2 NEN-Normen

Normen en richtlijnen worden in Nederland door de Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut (NEN) uitgewerkt. NEN is geen overheidsinstantie en normen zijn geen wetten, maar eisenstellende documenten waarover marktpartijen consensus hebben bereikt. NEN normen vatten de laatste stand van de techniek samen en bieden een standaard waaraan bedrijven zich kunnen houden om bepaalde technieken op een veilige manier toe te passen. NEN biedt ook toegang tot internationale normen zoals ISO/IEC en CEN/CENELEC⁹. Een aantal relevante normen zijn in deze sectie samengevat.

NEN6060 en NEN6079 Brandveiligheid van grote brandcompartimenten

Deze normen hebben als doel de ongehinderde uitbreiding van branden te beperken door brandcompartimentering. Het is geldig voor grote gebouwen zoals bijvoorbeeld voertuigstallingen van logistiekvoertuigen groter dan 1000 m². Het biedt methodes voor het bepalen van de brandcompartimenten. NEN 60079 geeft een methode voor brandbeheersing en de beperking van uitbreiding van brand op basis van risicobenadering en fysische brandmodellering. Beide normen zijn rechtstreeks aangewezen in het Bbl.

NEN1010 Elektrische installaties voor laagspanning

De norm bevat regels voor het veilige aanleggen en uitbreiden van laagspanningsinstallaties, zoals laadpunten. Het is zowel van toepassing voor industriële terreinen als voor bouwplaatsen. Het is gebaseerd op de internationale standaard voor elektrische installaties NEN-EN-IEC 60364. Het is wettelijk aangewezen in het Bbl.

NEN3140 Bedrijfsvoering van elektrische installaties - Laagspanning

Doel van deze norm is de waarborging van de veiligheid van werkzaamheden rondom elektrische installaties (tot 1000 V wisselspanning en 1500 V gelijkspanning). De norm vereist onder andere dat installatie door een deskundig persoon ontworpen moet zijn en dat een installatieverantwoordelijke wordt aangewezen die de installatiegoedkeuring uitvoert. Het is aangewezen in het Arbeidsomstandighedenbesluit.

NEN 3840 Werken aan hoogspanningsinstallaties

Deze norm gaat over de veilige bedrijfsvoering van elektrische installaties en arbeidsmiddelen met een spanning boven de 1000 volt wisselspanning (effectief) of 1500 volt gelijkspanning.

NEN9140 Veilig werken aan e-voertuigen

De norm is afgeleid van NEN3140. Het bevat de globale aanwijspprocedure voor veiligheidsinstructies voor werknemers die aan elektrische voertuigen werken. Het stelt eisen aan de organisatie van de werkzaamheden, werkplaatsinrichting, gebruikte gereedschappen en persoonlijke beschermingsmiddelen. De norm bevat daarnaast voorschriften voor de veilige opslag van (mogelijk) beschadigde elektrische voertuigen en gevaarlijke onderdelen van deze voertuigen.

⁹ Zie bijvoorbeeld [Normen voor producten, diensten of bedrijfsprocessen | Certificaten, normen en meetinstrumenten | Rijksoverheid.nl](#).

NEN-ISO 6469 serie: Elektrisch aangedreven wegvoertuigen – Veiligheidsspecificaties

Deze norm specificeert veiligheidseisen voor oplaadbare energieopslagsystemen (RESS) van elektrisch aangedreven wegvoertuigen voor de bescherming van personen.

Eisen laadinfrastructuur:

NEN-EN-IEC 61851-1. Deze serie van normen is van toepassing op de (DC- en AC-) laadinfrastructuur voor EV-voertuigen. De norm beschrijft de mechanische en elektrische (prestatie-) eisen alsook de eisen ten aanzien communicatie en elektromagnetische compatibiliteit.

NEN-EN-IEC 62196. Deze serie van normen is van toepassing op de contactstoppen, contactdozen, voertuigcontactstoppen en voertuigcontactdozen.

NEN-EN-ISO 15118. Deze serie normen heeft betrekking op de communicatie-interface tussen een wegvoertuig en het elektriciteitsnetwerk.

NEN-EN-IEC 62485 Veiligheidseisen voor oplaadbare batterijen en batterij-installaties

De norm is van toepassing op de installatie van lithium-ion batterijen met een maximale totale DC-spanning van 1500 V op elk DC-deel van het elektriciteitsnetwerk. De norm beschrijft de belangrijkste maatregelen voor bescherming tijdens normaal bedrijf of onder verwachte storingsomstandigheden tegen gevaren die worden veroorzaakt door: - elektriciteit, - kortsluiting, - elektrolyt, - gasemissie, - brand, - explosie. Dit document bevat eisen met betrekking tot veiligheidsaspecten die verband houden met de installatie, het gebruik, de inspectie, het onderhoud en de verwijdering van lithium-ion batterijen die worden gebruikt in stationaire toepassingen.

NEN-EN-IEC 62660 Oplaadbare lithium-ion cellen voor de voortstuwing van elektrische voertuigen

Deze norm specificeert prestatie- en levensduurtesten van lithium-ion batterijen die worden gebruikt voor de voortstuwing van batterij-elektrische voertuigen (BEV) en hybride elektrische voertuigen (HEV). Dit document biedt de standaardtestprocedures en -voorwaarden voor het testen van basisprestatiekenmerken van lithium-ion cellen voor voertuigvoortstuwings toepassingen.

NEN-EN-IEC 62485 serie:

Deel 5: Veilig gebruik van stationaire lithium ion batterijen

De norm is van toepassing op de installatie van stationaire batterijen. De norm beschrijft de belangrijkste maatregelen voor bescherming tijdens normaal bedrijf of onder verwachte storingsomstandigheden tegen gevaren die worden veroorzaakt door bijvoorbeeld kortsluiting, brand of explosie. Dit document bevat eisen met betrekking tot veiligheidsaspecten die verband houden met de installatie, het gebruik, de inspectie, het onderhoud en de verwijdering van lithium-ion batterijen die worden gebruikt in stationaire toepassingen.

Deel 6: Veiligheidseisen voor oplaadbare batterijen en batterij-installaties - Veilig werken met lithium-ion batterijen in tractie toepassingen

De norm is van toepassing op batterijen die worden gebruikt voor elektrische (werk)voertuigen die niet de weg op gaan. Voorbeelden van de toepassingen zijn onder andere vrachtwagens voor materiaalbehandeling, zoals heftrucks. Dit document behandelt de veiligheidsaspecten van batterij-installaties in dergelijke toepassingen.

NEN4288 Bedrijfsvoering van batterij-energieopslagsystemen

Aanvullende eisen op NEN 3140. Het geeft onder andere aan dat EOS'en jaarlijks worden gecontroleerd moeten worden.

NEN-EN-IEC 63056 en 62619 Oplaadbare cellen en batterijen met alkalische of andere niet-zure elektrolyten - Veiligheidseisen voor oplaadbare lithium cellen en batterijen voor gebruik bij elektrische energieopslag

NEN-EN-IEC 63056 specificeert eisen en testen voor de productveiligheid van lithiumcellen en batterijen die worden gebruikt in elektrische energieopslagsystemen met een nominale DC-spanning van maximaal 1500 V. De basisveiligheidseisen voor de lithiumcellen en batterijen die worden gebruikt in industriële toepassingen zijn opgenomen in IEC 62619.

ISO16750 serie: Wegvoertuigen - Omgevingscondities en beproeving voor elektrische en elektronische apparatuur

De norm is van toepassing op elektrische en elektronische systemen en componenten voor voertuigen, inclusief elektrische aandrijfsystemen en componenten. Het beschrijft de potentiële omgevingsstressen en specificeert tests en vereisten voor de specifieke montagelocatie op/in het voertuig.

NEN 60079 Explosieve atmosferen

De normenserie richt zich op explosieveiligheid. Deze normenserie behandelt het omgaan met explosiegevaar door brandbare gassen (zoals waterstof), stoffen en nevels. In deze serie bestaan onder andere normen voor het classificeren van gevaarlijke gebieden, kwalificaties van personeel en ontwerp, opstelling, inspectie en onderhoud van elektrische installaties. De Nederlandse praktijkrichtlijn **NPR 7910 Gevarenzone-indeling met betrekking tot explosiegevaar** geeft informatieve aanwijzingen bij het opstellen van een gevarenzone-indeling met betrekking tot gasexplosiegevaar. Het dient als praktisch hulpmiddel ter nadere uitvoering van NEN 60079 en behoort in samenhang met die norm te worden gelezen.

1.4.3 NFPA-standaarden

De National Fire Protection Association ([NFPA](#)) is een Amerikaanse non-profit organisatie met het doel kennis te verspreiden over onder andere het voorkomen van branden. Hiervoor heeft de NFPA standaarden publiceert. Deze standaarden zijn niet in de Nederlandse wetgeving aangewezen, maar worden in de industrie op veel plaatsen toegepast (Reinders et al., 2024).

Een aantal NFPA-standaards die relateert zijn aan de onderwerpen in dit onderzoek zijn:

- [NFPA 2](#): Deze code biedt fundamentele maatregelen voor de productie, installatie, opslag, leidingen, het gebruik en de verwerking van waterstof in de vorm van gas of cryogene vloeistof.
- [NFPA 70](#): ook National Electrical Code (NEC), is de standaard voor veilig elektrisch ontwerp, installatie en inspectie om mensen en eigendommen te beschermen tegen elektrische gevaren.
- [NFPA 855](#): Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems, bevat de minimale eisen voor het beperken van de gevaren in samenhang met EOS'en.

2 Batterijen

2.1 Opbouw van een lithium-ion batterij

Bij elektrisch aangedreven AAV's wordt momenteel (vrijwel) uitsluitend gebruik gemaakt van lithium-ion batterijen. De basiseenheid van een lithium-ion batterij is de batterijcel. Batterijcellen bestaan in drie verschillende vormen, namelijk: cilindrische, pouch en prismatische cellen (Figuur 2.1).

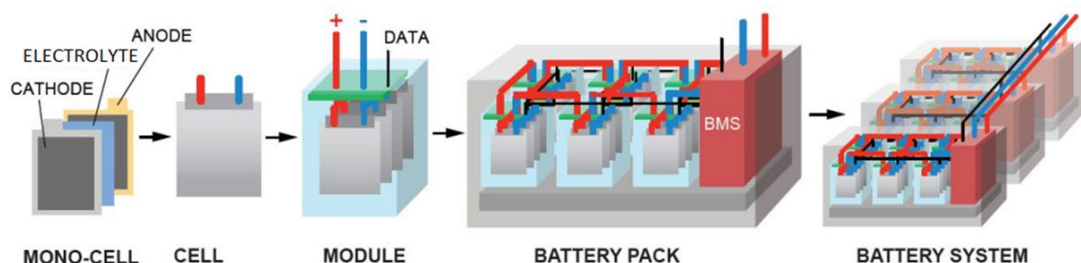
Tussen cilindrische cellen zit ruimte wat de warmteafvoer bevordert. Daarnaast hebben cilindrische cellen een metalen omhulsel dat een hoge druk kan weerstaan (Schröder et al., 2017). Een prismatische cel heeft dit ook, maar de warmteafvoer is lager dan cilindrische cellen. De behuizing van een pouch cel bestaat over het algemeen uit een composiet van aluminium en plastic dat minder druk kan weerstaan dan cilindrische cellen (Chen et al., 2021).

Types of Lithium Batteries



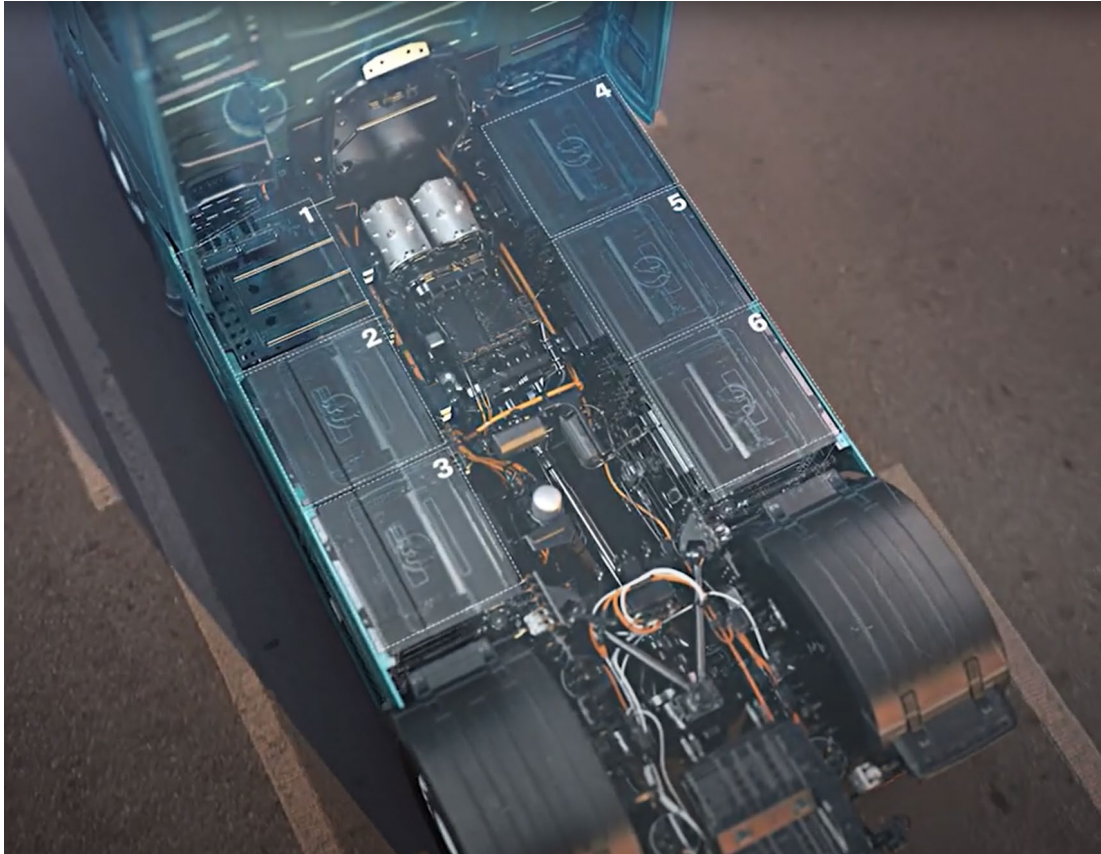
Figuur 2.1 Prismatische, pouch en cilindrische batterijcel (Huiyao-Laser, 2022)

Met meerdere batterijcellen samen kan een batterijsysteem worden opgebouwd. In Figuur 2.2 is schematisch de opbouw van een lithium-ion batterijsysteem weergegeven. In Figuur 2.3 staan worden de batterijpakketten van een vrachtwagen weergegeven.



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

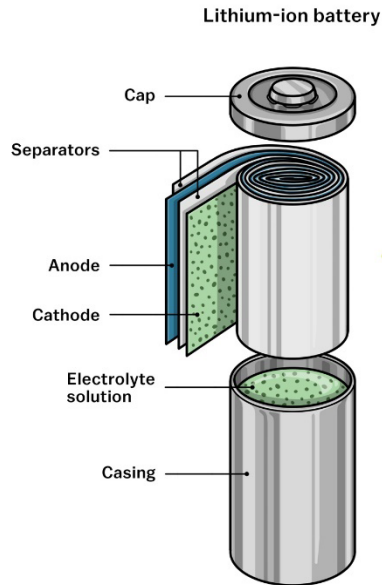
Figuur 2.2 Opbouw van lithium-ion batterijsysteem.



Figuur 2.3 Batterijpakketten in Volvo vrachtwagen (Volvo, 2024)

2.2 Werking van een lithium-ion batterij

In Figuur 2.4 is een (cilindervormige) lithium-ion batterijcel weergegeven. De drie basiscomponenten van een batterijcel zijn de anode, kathode en het elektrolyt. De anode is verbonden met de minpool en de kathode met de pluspool van de batterij. Daartussenin bevindt zich het elektrolyt. Dit is bij de huidige batterijtypen een vloeistof. Ter voorkoming van kortsluiting is een separator noodzakelijk tussen de anode en kathode. Voor alle drie de componenten kunnen verschillende materialen worden gekozen, waardoor verschillende subtypen ontstaan. De anode is in de huidige batterijcellen gemaakt van grafiet en de kathode van materiaal dat bestaat uit lithiumverbindingen. Het elektrolyt in huidige batterijcellen is vloeibaar en brandbaar en bestaat uit een mengsel van lithiumzouten, oplosmiddelen en additieven.

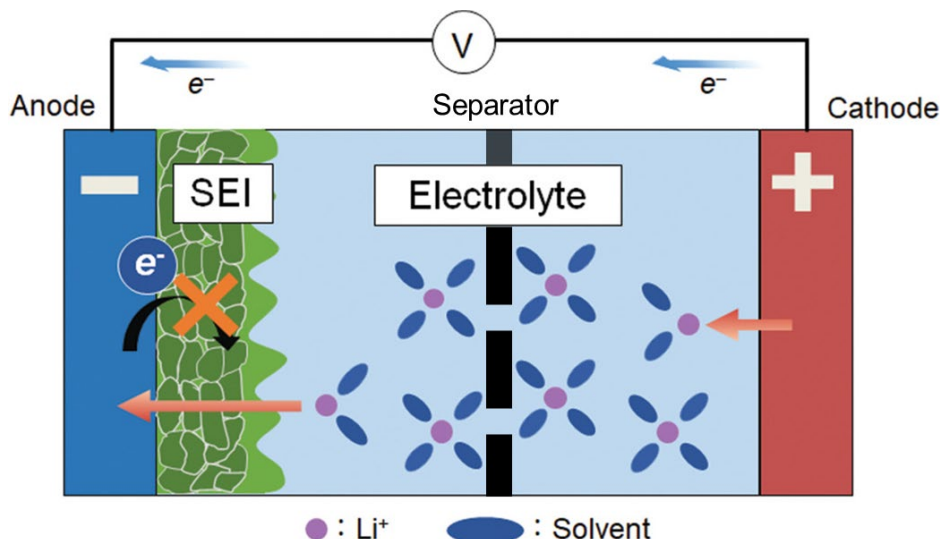


Figuur 2.4 Inwendige van cilindrische lithium-ion batterijcel (Heilweil & Rodgers, 2022)

Batterijen zijn elektrochemische cellen. Dit betekent dat er elektrochemische reacties plaatsvinden tijdens het op- en ontladen. De elektrochemische reactie vindt bij lithium-ion batterijen plaats tussen de lithium-ionen en elektronen. Voor dit proces is het van belang dat de elektrochemische reacties gecontroleerd plaatsvinden. De batterijcel dient hiervoor stabiel te zijn, wat wil zeggen dat er geen ongewenste effecten of reacties plaatsvinden.

Het Solid Electrolyte Interphase (SEI) speelt hierbij een belangrijke rol. Het SEI is een microscopisch afzettingslaagje dat wordt gevormd en zich hecht aan de anode tijdens de eerste paar laadcycli. Om ervoor te zorgen dat de batterijcel stabiel blijft, is een zorgvuldig samengesteld elektrolyt met de juiste eigenschappen noodzakelijk. Het SEI voorkomt onder meer dat elektronen ongecontroleerd overspringen als de batterijcel vol is, en vormt daarmee een belangrijke factor voor de stabiliteit van batterijcellen. De separator speelt geen directe rol bij het opladen en ontladen maar zorgt voor elektrische scheiding van de anode en kathode waardoor interne kortsluiting wordt voorkomen.

Tijdens het gebruik van de batterij gaan lithium-ionen heen en weer door het elektrolyt van de kathode naar de anode en vice versa. Tegelijkertijd verlaten elektronen de batterijcel en vloeien door het elektrische circuit om zo een elektrische stroom te genereren. Hiermee komt de primaire eigenschap van het elektrolyt naar voren: het laat wel ionen door, maar geen elektronen. In Figuur 2.5 is een deel van een batterijcel uitvergroot. Weergegeven zijn de drie basiscomponenten (anode, kathode en elektrolyt), met daarbij de separator en het Solid Electrolyte Interphase (SEI). In Figuur 2.5 is het opladen schematische weergegeven. Hierbij bewegen lithiumionen (Li^+) en elektronen (e^-) zich van de kathode (+) naar de anode (-), waarna ze weer bij elkaar komen in de anode, totdat de batterij is opgeladen, of de externe voedingsbron (V), die de energie levert (bijvoorbeeld een windmolen of zonnepaneel), wordt losgekoppeld. Bij het ontladen vindt het proces in omgekeerde richting plaats, namelijk van anode (-) naar kathode (+) en zal de voeding worden vervangen door een (elektro)motor, die de energie verbruikt. Deze [link](#) verwijst naar een animatie waar dit proces is weergegeven.



Figuur 2.5 Schematische weergave van lithium-ion batterij tijdens het opladen (Takenaka et al., 2021)

2.3 Lithium-ion subtypen

Door de chemische samenstelling van de anode, kathode of het elektrolyt aan te passen zijn verschillende varianten van lithium-ion batterijen ontwikkeld. In Tabel 2.1 zijn de huidige subtypen lithium-ion weergegeven (Brans, 2023b).

Tabel 2.1 Huidige en toekomstige subtypen lithium-ion

Subtype	Anode (-)	Elektrolyt	Kathode (+)
NMC	Grafiet	Vloeibaar, bestaand uit een mengsel van:	Lithium-nikkel-mangaan-kobaltoxide
NCA			Lithium-nikkel-kobaltoxide
LMO		> Lithiumzouten	Lithium-mangaanoxide
LTO		> Oplosmiddelen	Lithiumtitanaat
LFP		> Additieven	Lithium-ijzer-fosfaat
Lithium-Silicium	> Grafiet-Silicium nanodeeltjes > Puur Silicium	Huidige vloeibare elektrolyten	Huidige kathodematerialen
Hybrid-Solid-State Lithium-ion	Huidige en nieuwe anodematerialen	Combinatie van vloeibaar en vaste stof elektrolyt, Huidige en nieuwe als aanloopfase naar een volledig vast elektrolyt.	kathodematerialen
Solid-State Lithium-ion		Vaste stof elektrolyt > Inorganic Solid Electrolytes > Garnet-based > Sulfide-based > Polymer-based	

Veel innovaties aan de lithium-ion batterij betroffen tot nu toe de **kathode**. Op dit moment worden voornamelijk nikkel, mangaan en kobalt gebruikt in de kathode van lithium-ion batterijen. Fabrikanten willen steeds minder nikkel en kobalt gebruiken vanwege prijsfluctuaties en de onethische kant van de winning. Om die reden wordt LFP (lithium-IJzer-Fosfaat) op dit moment steeds meer toegepast; dit kent minder materiaaltekorten en ethische problemen rondom de winning. Van oorsprong bestaat de **anode** van lithium-ion

batterijen uit grafiet en door de jaren heen zijn hier eigenlijk alleen maar kleine verbeteringen aan doorgevoerd. Om een grote stap voorwaarts te zetten in energiedichtheid is de overstap naar een nieuw materiaal nodig. In een vergevorderd stadium van ontwikkeling is silicium.

Bij een solid-state batterij is het vloeibare **elektrolyt** vervangen door een vaste stof elektrolyt (Solid-State Electrolyte), dat thermisch stabiel is waardoor het pas bij hogere temperaturen instabiel wordt en daarmee brandveiliger is. Onder de noemer solid-state batterijen vallen vaak ook zogeheten hybrid solid-state batterijen. De hybrid solid-state, quasi solid-state of liquid-solid batterijen zijn in zekere zin een soort tussenstap naar de batterijen met een volledig vast elektrolyt. Bij lithium-Metal is de anode gemaakt van puur lithiummetaal. Probleem van puur lithium is echter de vorming van dendrieten die tot kortsluiting kunnen leiden, omdat dendrietvorming elektrochemisch gezien het sterkste optreedt bij puur lithiummetaal. Als oplossing hiervoor wordt gewerkt aan allerlei tussenlaagjes en coatings alsook een aangepast elektrolyt.

In de praktijk worden momenteel uitsluitend lithium-ion batterijen toegepast en wel twee types: LFP en NMC. Bij LFP batterijen bestaat de kathode uit lithium-ijzer-fosfaat). Bij NMC batterijen bestaat de kathode uit nikkel, mangaan en kobalt. NMC is gunstiger voor mobiele systemen vanwege de hogere energiedichtheid. LFP-batterijen hebben een hogere thermische stabiliteit dankzij een hogere initiëletemperatuur van een Thermal Runaway. Daarom worden door fabrikanten LFP-batterij vaak als veiliger beschouwd.¹⁰ Indien energiedichtheid wat minder van belang is, zoals in stationaire systemen, worden LFP-batterijen dan ook regelmatig toegepast. Niettemin worden ook in toenemende mate LFP-batterijen toegepast in mobiele systemen (Lokhande, 2024). In aanvulling op de veiligheidsvoordelen spelen milieu en ethische factoren hierbij een rol.

2.4 Veiligheidsrisico's van lithium-ion batterijen

Batterijpakketten kunnen zijn opgebouwd uit meerdere modules en elke module bevat meerdere batterijcellen. Bij de elektrochemische reacties binnen in de batterij wordt warmte geproduceerd. Indien een batterijcel beschadigd is kan hierdoor overmatige warmte worden geproduceerd, die niet voldoende kan worden afgevoerd naar de omgeving waardoor de temperatuur in de cel zal oplopen. Als gevolg hiervan gaat de reactiesnelheid in de cel omhoog, waardoor de temperatuur nog meer toeneemt. Op dat moment warmt de batterijcel zichzelf op. Dit proces heet een “thermal runaway”, een ongecontroleerde reactie waarbij de temperatuur snel oploopt en het elektrolyt ontleedt waardoor er brandbare en toxische gassen binnen de cel worden gevormd¹¹. Als gevolg van de gasvorming zal de batterijcel uiteindelijk openbreken (Wang et al. 2019) waardoor de toxische en brandbare gassen vrijkomen. De thermal runaway gaat door tot alle energie uit de batterij is en wordt gezien als het belangrijkste veiligheidsrisico van lithium-ion batterijen.

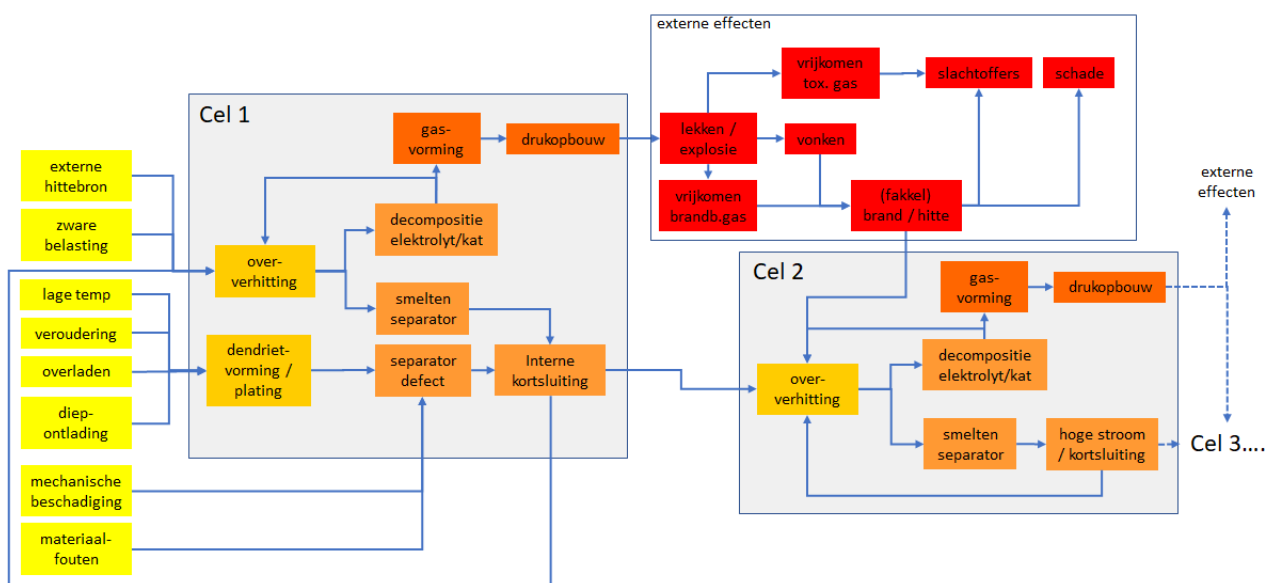
¹⁰ Er spelen echter meerdere factoren een rol bij een veiligheidsanalyse, zoals bijvoorbeeld het ontstaan van onbalans tussen verschillende batterijcellen ([NMC vs LFP: safety and performance in operation - PowerUp \(powerup-technology.com\)](#)) of ontvlambaarheid en toxiciteit van vrijkomende gassen ([Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure — Considering toxic and flammable compounds - ScienceDirect](#)).

¹¹ Zie ook: [NIPV Explainer Video Thermal Runaway](#)

Oorzaken van een thermal runaway zijn thermische, elektrische of mechanische beschadigingen:

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

In Figuur 2.6 zijn de processen die een rol spelen bij een thermal runaway in detail weergegeven (Euralarm, 2022; Sun et al., 2020).



Figuur 2.6 Gebeurtenissenboom¹² voor een thermal-runaway van een batterijpakket (gebaseerd op (Euralarm, 2022; Sun et al., 2020).

Centraal staan de decompositie van het elektrolyt en het ontstaan van een defect in de separator van een batterijcel. Indien deze door thermische, elektrische of mechanische oorzaken defect raakt, ontstaat er intern kortsluiting in de cel en raakt de cel oververhit. Dit kan leiden tot verdere beschadiging / smelten van de separator, met als gevolg nog meer warmteontwikkeling en ontleding van het elektrolyt en mogelijk de kathode waarbij gas wordt gevormd. De vorming van gas leidt tot drukopbouw in de cel. Hierdoor kan de cel openbreken waardoor het gas uit de cel ontsnapt. De warmteontwikkeling kan tot oververhitting van naburige cellen leiden waardoor ook naastgelegen batterijcellen in de batterijmodule/pakket in een thermal runaway raken. Dit wordt thermische propagatie genoemd. De drukopbouw als gevolg van de gasontwikkeling uit de batterijcellen kan tot barsten van het batterijpakket leiden, waardoor gassen vrijkomen en batterijonderdelen

¹² Een gebeurtenissenboom bevat een aantal, door causale verbanden met elkaar verbonden, opeenvolgende gebeurtenissen. Veelal worden hiermee de mogelijke varianten weergegeven van de wijze waarop een incident zich kan ontwikkelen.

kunnen worden gelanceerd. De mogelijk gevolgen van een thermal runaway zijn verdere branduitbreiding (door bijv. fakkels) en gezondheidsschade (Euralarm, 2022).

Het volume en de verhouding van de vrijkomende gassen als gevolg van een thermal runaway wisselen sterk per batterij-subtype en incident. Dit betekent dat er een grote onzekerheid is in zowel gasvolume als -percentages. Gerapporteerde totaalvolumes van een gevormde gaswolk variëren tussen de 550 – 3300 l/kWh (DNV, 2019) en 300 – 6000 l/kWh (Brans, 2023a).

De geschatte faalfrequentie voor een batterijmodule voorzien van onder meer een effectief batterij management system (zie paragraaf) en circuitonderbreking bedraagt $1,4 \times 10^{-4}$ per jaar. Indien elke vorm van veiligheidssysteem, monitoring of circuitonderbreking ontbreekt, kan de geschatte faalfrequentie in het uiterste geval oplopen tot $2,3 \times 10^{-2}$ per jaar (Brans, 2023a).

2.4.1 Batterijbrand

In de meeste gevallen ontsteken de brandbare gassen direct, of enkele seconden nadat ze zijn vrijgekomen uit het batterijpakket, resulterend in een batterijbrand waarbij ook toxische stoffen vrijkomen. De bestrijding van een batterijbrand is lastig door de goede afscherming van de pakketten tegen water. Batterijpakketten zijn gemaakt om water buiten te houden waardoor ook blus- of koelwater niet bij de thermal runaway, ofwel de bron van de brand kan komen. Ook kan, nadat een batterijbrand is geblust maar nog niet alle energie uit de batterij is, de thermal runaway, en dus de hitteontwikkeling weer opnieuw beginnen, waardoor na enige tijd herontsteking plaatsvindt en opnieuw een batterijbrand ontstaat. Daarom moet gedurende lange tijd (soms uren) water beschikbaar zijn om eventueel opnieuw oplaaierende branden te bestrijden. Voor personenauto's zijn daartoe speciale dompelcontainers ontwikkeld waarin een auto gedurende langere tijd volledig ondergedompeld kan worden in water. Door de constante koeling van het water kan de thermal runaway gecontroleerd plaatsvinden tot alle energie uit de batterij is (Hessels & Geertsema, 2023). Er is ten tijden van het schrijven van deze rapportage nog geen dompelcontainer van een formaat waarin grote / zware elektrische voer- of werktuigen beschikbaar die ingezet kan worden tijdens incidenten.

De locatie waar de batterijbrand plaatsvindt beïnvloed het brandverloop. Inpandig kan ophoping van hitte en rook voor (een snellere) branduitbreiding zorgen. Bij buitenlocaties kunnen naburige brandbare objecten in brand raken. Onvoldoende bereikbaarheid/obstructies kunnen zowel binnen als buiten brandbestrijding hinderen. Men moet erop zijn bedacht dat benaderen van het object, nadat het is geblust, gevaarlijk kan zijn in verband met de mogelijke herontbranding van het batterijpakket. Indien een batterijbrand een bedreiging vormt voor de omgeving concluderen wij dat:

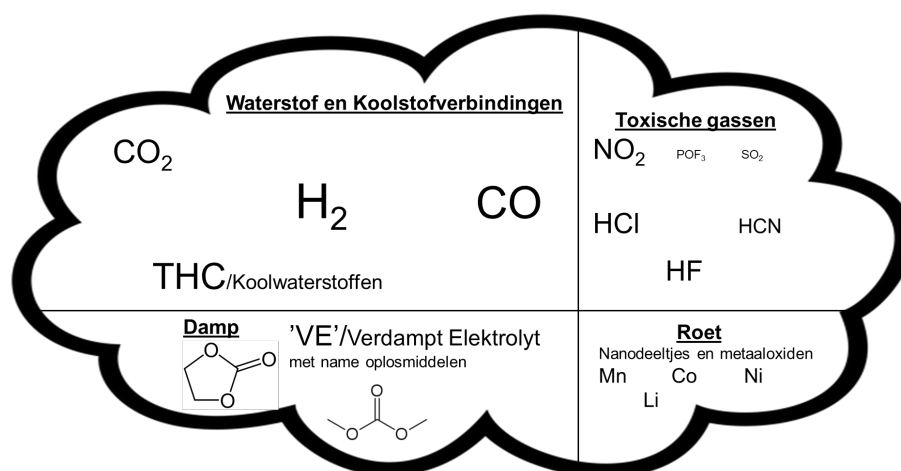
- > (niet stationaire) blusfaciliteiten lange tijd gereed / stand-by moeten zijn.
- > het voer- of werktuig moet worden weggesleept en gestald op een veilige locatie.
- > de brandende batterij moet worden gedemonteerd en weggehaald.
- > een fysieke afscherming naar (brandbare) objecten in de omgeving wordt aangebracht.

2.4.2 (dampwolk)explosie

In de meeste gevallen ontsteken de brandbare gassen direct. Maar indien de brandbare gassen niet direct ontsteken en zich ophopen, kan er door een vertraagde ontsteking een explosie ontstaan. Dit zijn in de buitenlucht over het algemeen kleinere explosies, die slechts leiden tot het enkele meters wegschieten van batterijcellen. Grotere explosies hebben in het verleden bijvoorbeeld voornamelijk plaatsgevonden met EOS'en voor grootschalige energieopslag, waarbij de brandbare gassen zich ophoopten in de unit waarin het batterijsysteem was geplaatst. Door de inmenging van lucht, bijvoorbeeld door het openen van deuren, kwam het brandbare gasmengsel binnen de ontstekingsgrenzen. Vertraagde ontstekingen vinden over het algemeen vaker plaats bij lagere state of charges (laadpercentages) (van Harn et al., 2024).

2.4.3 Toxische stoffen

Bij een thermal runaway komen naast brandbare, ook toxische gassen vrij. Een schematische weergave hiervan is weergegeven in Figuur 2.7. Er komen zowel gassen vrij die zwaarder als lichter dan lucht zijn (Brans, 2023a).



Figuur 2.7: Brandbaar en toxisch gasmengsel Thermal Runaway (Brans, 2023a).

In Tabel 2.2 is een indicatie weergegeven van de toxische gassen die kunnen vrijkomen; de waarden zijn gebaseerd op een serie experimenten van DNV, 2019. Met deze gegevens zijn denkbare volumes van de toxische gassen berekend, waarbij is uitgegaan van een gevormde toxische gaswolk van 750 l/kWh. In deze tabel zijn ter referentie de Immediate-Dangerous-to-Life-or-Health-waarde (IDLH) en Levensbedreigende Waarde bij blootstellingsduur 10 minuten (LBW) weergegeven (Brans, 2023a).

Tabel 2.2 Indicatie toxische gassen bij een 750 l/kWh gaswolk (op basis van DNV, 2019)

Product		Maximum vol%	l/kWh	Gasvolume in liters bij batterijmodule van 15 kWh	IDLH (ppm)	LBW 10 min. (ppm)
CO	Koolmonoxide	38,1%	286	4286	1200	1718
HF	Waterstoffluoride	3,7%	28	416	30	150
NO ₂	Stikstofdioxide	9,7%	73	1091	20	115
HCl	Waterstofchloride	9,7%	73	1091	50	336
HCN	Waterstofcyanide	0,7%	5	79	50	100

2.5 Batterijmanagementsysteem (BMS)

Een BMS kan verschillende parameters meten binnen een batterijsysteem. Over het algemeen zijn dit spanning-, stroom- en temperatuurmetingen over de batterijcellen en -pakket. Op basis van deze metingen zorgt het BMS dat het batterijsysteem binnen de operationele grenzen blijft werken, door bijvoorbeeld de laadpercentages van de individuele batterijcellen te reguleren, en deze onderling te balanceren. Daarnaast bewaakt het BMS de veiligheid. Wanneer er daadwerkelijk een thermal runaway plaatsvindt kan het BMS niets doen om deze te stoppen. Wel kan het BMS afwijkende waarden meten die mogelijk duiden op factoren die zijn ontstaan als gevolg van thermische, elektrische en/of mechanische beschadigingen, en tot een thermal runaway kunnen leiden. Bij het waarnemen van deze factoren kan het BMS (van Harn & Reinders, 2025):

- > Batterijcellen, -modules of het gehele batterijsysteem uit te schakelen waardoor verdere schade, en mogelijk een thermal runaway kan worden voorkomen.
- > Alarmeringen geven over dat er iets mis is in de batterij waardoor gevaar kan ontstaan.
- > Het aansturen van repressieve maatregelen die bijdragen aan het gecontroleerd laten verlopen van de thermal runaway om gevaren van effecten in te perken. Zoals bijvoorbeeld blusgasinstallaties of ventilatiesystemen die toxische en brandbare gassen afvoeren.

Het up-to-date houden van het BMS en het naleven van adviezen van de fabrikant of leverancier ten aanzien van bijvoorbeeld gebruiksduur van batterijsystemen, zijn belangrijk voor adequate monitoring van het batterijsysteem.

2.6 Innovaties

De mate waarin al deze processen de veiligheidstoestand van batterijen beïnvloeden en in hoeverre ze door het BMS kunnen worden vastgesteld wordt nog volop onderzocht. Zo is de invloed van veroudering een belangrijk onderwerp van studie (Mylenbusch et al., 2023; Reinders et al., 2024). In een overzichtsartikel beschrijft (Zhi et al., 2024) recente

ontwikkelingen ter verhoging van de veiligheid van lithium-ion batterijen (dus ter preventie van een thermal runaway). Ontwikkelingen zijn vooral gericht op:

- > Intrinsiek veilige batterijtechnologie: Het maken van een intrinsiek veiligere batterij kan worden bereikt door verhoging van de thermische stabiliteit. Belangrijke ontwikkeling hiervoor is de ontwikkeling van een vaste stof elektrolyt (de zogeheten solid-state batterijen) (Brans, 2023b).
- > Verbeterde koeling: Ten aanzien van koeling van batterijen in het batterijpakket krijgt vloeistofkoeling veel aandacht, maar ook naar luchtkoeling, koeling op basis van PCM (Phase Change Materials)¹³ en koeling via een 'heat pipe'¹⁴ wordt onderzoek gedaan.
- > Methodes voor een eerdere detectie van een (dreigende) thermal runaway: Momenteel wordt nog vooral gebruikgemaakt van parameters buiten batterijcellen (stroom, spanning en temperatuur). Onderzoek richt zich bijvoorbeeld op het mogelijk kunnen detecteren van factoren binnen cellen die eerder zijn waar te nemen, en gasdetectie van gassen die in een vroeg stadium als gevolg van elektrochemische reacties vormen (van Harn & Reinders, 2025; Kong et al., 2023).

2.6.1 Natrium-ion batterijen

Een mogelijk toekomstig alternatief voor de lithium-ion batterij is de natrium-ion batterij. Bij natrium-ion (natrium-ion, of in het Engels Sodium-ion) batterijen vormen natriumionen (Na^+) elektrische ladingsdragers in plaats van lithiumionen (Li^+). Natrium-ion batterijen hebben dezelfde werkingsprincipes als lithium-ion batterijen. De systemen zijn ook op dezelfde manier opgebouwd. Een belangrijk nadeel van natrium-ion batterijen ten opzicht van lithium-ion batterijen is de geringere energiedichtheid (kWh/kg). Dit speelt met name bij mobiele systemen een belangrijke rol, waardoor natrium-ion batterijen met name interessant zijn voor de stationaire opslagsystemen, zoals thuisbatterijen en buurtbatterijen. Een belangrijk voordeel van natrium daarentegen is dat er veel meer natrium dan lithium op de wereld beschikbaar is.

Net als bij de lithium-ion batterij kunnen bij de natrium-ion batterij verschillende werkzame materialen worden gebruikt voor de anode, kathode en het elektrolyt. De verwachte ontwikkeling is globaal weergegeven in Tabel 2.3. In eerste instantie zullen natrium-ion batterijen met een vloeibaar elektrolyt op de markt komen en een anode van op koolstof gebaseerde materialen. De eerste kathodes kunnen zijn samengesteld uit nikkel en mangaan, zogeheten transitie-metalen. Op termijn zijn verbeterde anodes en kathodes te verwachten en zullen de eerste vaste stof elektrolyten beschikbaar komen, waardoor er ook Solid-State natrium-ion batterijen zullen ontstaan.

¹³ Bij een fase-overgang, bijvoorbeeld van vast naar vloeibaar, neemt een materiaal relatief veel energie op zonder dat hierbij de temperatuur oploopt.

¹⁴ Bij een heat pipe wordt gebruik gemaakt van de fase-overgang vloeistof-damp. In het deel van de heat pipe dat contact maakt met de hittebron verdampt vloeistof. Door het ontwerp van het systeem begeeft de damp zich naar een ander deel van de heat pipe dat door bijvoorbeeld lucht wordt gekoeld. De damp condenseert dan weer tot vloeistof en vindt zijn weg naar het 'hete' deel van de heat pipe.

Tabel 2.3: Mogelijke materialen natrium-ion (Brans, 2023b).

Subtype	Anode (-)	Elektrolyt	Kathode (+)
Sodium-ion (Natrium-ion)	Diverse anodematerialen zijn in ontwikkeling, waaruit verschillende subtypen zullen ontstaan: > Cold Based Carbon > Hard Carbon > Titaniumnitride	Vloeibaar, bestaand uit een mengsel van: > Natriumzouten > Oplosmiddelen > Additieven	Diverse kathodematerialen zijn in ontwikkeling, waaruit verschillende subtypen zullen ontstaan: > Natrium- transitie- metaal-oxiden > Polyanion
Hybrid-Solid-State		Combinatie van vloeibaar en vaste stof elektrolyt, als aanloopfase naar een volledig vast elektrolyt.	
Solid-State Sodium-ion		Toekomstig vaste stof elektrolyt	

Omdat de aard van de veiligheidsrisico's en de effecten naar verwachting vergelijkbaar zullen zijn met die van lithium-ion batterijen kunnen bestaande richtlijnen voor risicobeheersing en incidentbestrijding vooralsnog ook op dit batterijtype worden toegepast (Brans, 2023b).

3 Waterstof

Waterstof is een gas bij omgevingstemperatuur en -druk. Om het commercieel te kunnen toepassen (vervoeren, opslaan) is het noodzakelijk de dichtheid, dat wil zeggen de massa per volume-eenheid, te verhogen, zoals dit ook het geval is met aardgas. Hiervoor bestaan twee mogelijkheden: waterstof wordt onder hoge druk (tot 900 bar) in gasvorm opgeslagen in (druk)cilinders of de waterstof wordt afgekoeld tot -253 °C en in cryogene tanks opgeslagen of vervoerd. De eerste van deze twee vormen is verreweg de meest gebruikte voor mobiele toepassingen. De laatste vorm is alleen rendabel in grote tanks, en wordt alleen toegepast (voorzien) voor (grote) vrachtauto's.

3.1 Brandstofcellen (FCEV)

Brandstofcellen genereren elektriciteit door waterstof met zuurstof uit de lucht te laten reageren tot water. Hierbij wordt elektrische energie opgewekt die wordt gebruikt voor de aandrijving (FCEV, Fuel Cell Electric Vehicle). Er is dan ook een lithium-ion batterijpakket aanwezig dat wordt opgeladen door de brandstofcel. Dit batterijpakket is ook aangesloten op een elektromotor en dient tevens als energievoorziening voor de overige elektrische installaties die aanwezig zijn. De momenteel verkrijgbare voer- of werktuigen die gebruik maken van waterstof als brandstof zijn uitsluitend van dit type (FCEV).

Waterstof wordt vanuit de waterstoftanks via een leidinginstallatie naar de brandstofcel getransporteerd. Deze leidinginstallatie bevat verbindingen en kleppen waaruit waterstof kan lekken. Rondom de brandstofcelinstallatie in waterstofvoertuigen zijn echter sensoren geplaatst die waterstof kunnen detecteren. Als dit gebeurt, wordt de waterstoftoevoer vanuit de waterstoftanks direct afgesloten en zal alleen de resterende hoeveelheid waterstof, die nog in de brandstofcel en toevoerleidingen aanwezig is vrijkomen. Deze hoeveelheid zal direct verdunnen en zal naar verwachting niet leiden tot een ontvlambare wolk (Spoelstra, 2021). Dergelijke lekkages komen vrijwel nooit direct uit de cabine- of kooiconstructie, omdat alle onderdelen die waterstof bevatten buiten de ruimtes zijn aangelegd waar personen aanwezig zijn (Brandweer Nederland, 2019c).

Verder staan (delen van een) brandstofcel onder hoogspanning. In voertuigen worden maatregelen genomen om deze hoogspanning te isoleren en af te schermen, waarbij ook rekening wordt gehouden met het scenario van een ongeval (Fuel Cells Works, 2022).

3.2 H₂-verbrandingsmotoren (H₂-ICE)

Het toepassen van waterstofmotoren in (zware) logistieke voertuigen bevindt zich momenteel in een ontwikkelingsfase. Op basis van een demomodel is geconcludeerd dat het nog geruime tijd zal duren voordat waterstofverbrandingsmotoren grootschalig geproduceerd kunnen worden. Bij de ontwikkeling van dit demomodel was het merk DAF betrokken (TNO,

2022). Op de website van Volvo Trucks staat dat zij naar verwachting vrachtwagens met waterstofverbrandingsmotoren vanaf 2030 op de markt zullen brengen (Bergstrand, 2024).

Waterstofmotoren brengen uitdagingen met zich mee, de injectie is gasvormig en heeft een lagere ontstekingsenergie vergeleken met fossiele brandstofmotoren. Er moeten oplossingen worden gevonden voor de smering van de bewegende delen van de injector. Daarnaast is ook de motorelektronica gecompliceerder dan bij een benzinemotor. Verder is de technologie achter waterstofmotoren over het algemeen hetzelfde als die van fossiele brandstofmotoren (KNAC, 2021; Maks, 2024; Waterstofgids, 2023).

In 2025 gaat het vrachtwagenmerk MAN de eerste vrachtwagens met een waterstofverbrandingsmotor (H₂-ICE) op de markt brengen in Nederland. Het betreft 250 vrachtwagens die zullen worden ingezet voor zwaar transport op de Maasvlakte. MAN geeft aan dat waterstoftrucks een goede oplossing kunnen bieden voor locaties waar laadinfrastructuur voor elektrische vrachtwagens moeilijk te realiseren is, maar het merk blijft vooral inzetten op elektrische vrachtwagens (Maks, 2024). Naar verwachting komen trucks met waterstofverbrandingsmotoren rond 2030 op de markt. Daarvoor dient ook de tankinfrastructuur voor waterstof verder te worden uitgebreid. Trucks met een waterstofverbrandingsmotor zijn geschikt voor lange afstanden wanneer laadvoorzieningen beperkt zijn (Bergstrand, 2024).

Ook waterstofmotoren voor bouwmachines bevinden zich in een ontwikkelingsfase. Zo heeft het Britse JCB, een bedrijf dat is gespecialiseerd in de productie van bouwmachines, een prototype graafmachine met een verbrandingsmotor ontwikkeld en gedemonstreerd (JCB, 2024).

3.3 Veiligheidsrisico's van waterstof

In H₂-ICE voer- en werktuigen vormen de hogedrukcilinders met waterstof naar verwachting het grootste brandrisico.¹⁵ Deze cilinders bevatten grote hoeveelheden licht ontvlambare en potentieel explosieve waterstof. Uiteraard kan ook uit andere onderdelen waterstof vrijkomen (leidingen, injectiesysteem¹⁶, mogelijk motorkoeling, verbrandingsmotor, e.d.), maar gezien de geringe energie-inhoud van deze systemen zullen deze naar verwachting een kleiner risico vormen.

Voor de FCEV voer- en werktuigen vormen niet alleen de waterstof-drukcilinders een gevaar¹⁷, maar ook het batterijpakket. Voor de veiligheidsaspecten van het batterijpakket geldt in principe hetzelfde als voor een EV-voer- of werktuig. Echter de energie-inhoud van de batterijpakketten is geringer, waardoor ook het brandvermogen lager is dan bij een EV-voer- of werktuig. Niettemin kan een thermal runaway nog wel een voer- of werktuigbrand veroorzaken met dezelfde gevolgen als een thermal runaway in een EV-voer- of werktuig. Opladen van de batterij zal overigens (voornamelijk) plaatsvinden als het voer- of werktuig in

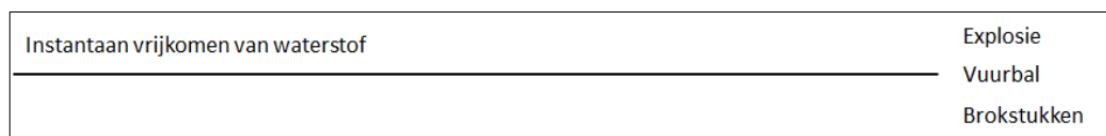
¹⁵ Dit zien we immers ook bij grote voertuigen (zoals bussen) die CNG (gecomprimeerd aardgas) zijn aangedreven.

¹⁶ Een benzinemotor heeft een vonk van 0,24 mJ nodig voor de ontsteking van het brandstofmengsel, waterstofmotoren slechts een vonk van 0,02 mJ. Wanneer de motor erg warm is kan dit leiden tot een spontane ontsteking (Waterstofgids, 2023). Een spontane ontsteking kan leiden tot een terugslag in de motor.

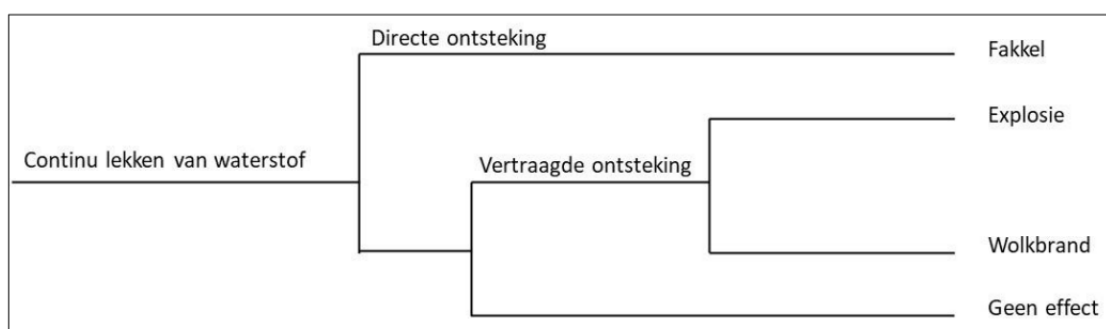
¹⁷ Ook hier geldt dat in andere systemen, zoals bijvoorbeeld de brandstofcel, brand kan ontstaan. Gezien echter de geringe energie-inhoud en lage druk zal dit naar verwachting een relatief kleiner risico vormen.

bedrijf is, en minder (of niet) tijdens niet-werkuren¹⁸, waardoor de omgeving tijdens het laden mogelijk varieert, en daarmee ook het risico voor de omgeving.

De effecten die op kunnen treden als gasvormig waterstof vrijkomt uit een systeem, worden weergegeven in een gebeurtenissenboom. De mogelijke effecten bij instantane uitstroming wordt weergegeven in de gebeurtenissenboom in Figuur 3.1, en voor continue uitstroom in Figuur 3.2.



Figuur 3.1 Gebeurtenissenboom van de instantane uitstroming van gasvormig waterstof (Spoelstra & van de Ven, 2025).



Figuur 3.2 Gebeurtenissenboom van de continue uitstroming van gasvormig waterstof (Spoelstra & van de Ven, 2025).

Het vrijkomen van gasvormig waterstof, uit bijvoorbeeld waterstofcilinders, kan leiden tot onderstaande effecten (Spoelstra & van de Ven, 2025; Spoelstra, 2021):

- > Instantaan falen / explosie gascilinder – Waterstof komt instantaan vrij door een explosie van de drukhouder.
- > Vuurbal – Bij de explosie van de drukhouder ontstaat een vuurbal.
- > Brokstukken – Bij de explosie van de drukhouder worden brokstukken gevormd die weggeslingerd worden.
- > Fakkel – Aanstraling van de tank door hitte van buitenaf leidt tot drukopbouw, opening van het veiligheidsventiel (een Thermally activated Pressure Release Device of TPRD) en afblazen van het gas met als gevolg een fakkelbrand. In dit scenario is het waterstof niet de oorzaak van de brand.¹⁹ Het zal enige tijd duren alvorens de TPRD open gaat. De TPRD gaat open bij 110 °C of bij het bereiken van het setpoint van de openingsdruk. Hoe lang dit duurt zal afhangen van de wijze waarop de tanks worden verwarmd en de intensiteit van het vuur. Na opening van de TPRD zal bij directe ontsteking een fakkel ontstaan. De lengte van de fakkel wordt in belangrijke mate bepaald door de grootte van de uitstroomopening, alsook de druk. Een kleinere opening resulteert in een kortere fakkel. Het duurt dan wel langer totdat de tank leeg is (Spoelstra, 2021). Uit een 6 mm opening van een cilinder met een druk van 350 bar zal een fakkel van ca. 5 m ontstaan

¹⁸Plug-in FCEV-voertuigen kunnen ook via een stekker worden opgeladen met dezelfde risico's als EV-voertuigen

¹⁹Bedenk dat het batterijpakket hierbij een additionele risicobron kan zijn. Als dit dicht bij de waterstofcilinders is gepositioneerd kan dit mogelijk direct de waterstofcilinders al zodanig verhitten dat het TPRD open gaat, nog voordat het voer of werktuig vlam vat, met een fakkel als gevolg. Enige afstand tussen batterijpakket en waterstofcilinders of een thermische bescherming is daarom aan te bevelen.

(berekend met EFFECTS). Indien deze fakkel verticaal omhoog is gericht zal deze alleen schade aanrichten boven het uitstroompunt. Er naast staande installaties of bouwwerken zullen dan niet beschadigd worden. Een zijdelings gerichte fakkel kan brand en slachtoffers veroorzaken. Een waterstoffakkel is onzichtbaar. Alleen als er zich brandbare deeltjes (stof bijvoorbeeld) in de fakkel bevinden is hij zichtbaar. Blussen / bestrijden van de waterstoffakkel is niet mogelijk. Bovendien duurt de fakkel, afhankelijk van de inhoud van de cilinder, hooguit enkele minuten. Indien mogelijk kan een door de fakkel aangestraald gebied nat worden gehouden door de brandweer.

- > Explosie geaccumuleerd waterstofgas– Vrijkomen van waterstofgas als gevolg van lekkage (door bijv. foutieve handelingen, of corrosie) kan mogelijk leiden tot een explosieve atmosfeer bij ophoping van het brandbare gas onder bijvoorbeeld overkappingen of in holle ruimtes. De grootte van de schade en de mate van branduitbreiding als gevolg van ontsteking van het opgehoopte gas zal afhangen van grootte van de explosieve wolk en mate van opsluiting. Een explosie volstrekt zich in korte tijd en is instantaan. Brandweerinzet zal dan ook hoofdzakelijk gericht zijn op veiligheid in de directe omgeving zoals voorkoming en beperking van (secundaire) branden (Brandweer Amsterdam-Amstelland, 2016).
- > Wolkbrand – Waterstof stroomt vanuit de drukhouder of vanuit een leiding continu in de open lucht. De waterstofwolk wordt vertraagd ontstoken en door de openheid van de omgeving ontstaat geen explosie maar een wolkbrand.
- > Geen effect – De vrijgekomen waterstof ontsteekt niet.

De belangrijkste gevaren bij een vuurbal, fakkelbrand en wolkbrand zijn warmtestraling en het risico op secundaire branden. Bij een explosie vormt de ontstane drukgolf het grootste gevaar, aangezien de overdruk kan leiden tot verwondingen bij personen en schade aan gebouwen.

3.4 Hydrozine (Mierenzuur)

Hydrozine (niet te verwarren met hydrazine, want dit is een andere stof) is een andere naam voor Mierenzuur²⁰. Mierenzuur kan worden gebruikt als waterstofdrager door het te ontleden (Interreg, 2024). Dit kan door middel van chemische processen zoals thermische decompositie, katalytische ontleding of elektrochemische reacties. Doordat mierenzuur vloeibaar is bij kamertemperatuur en atmosferische druk kan het relatief eenvoudig worden opgeslagen. Dit in tegenstelling tot waterstofgas, dat in het algemeen onder hoge druk in cilinders wordt opgeslagen, hetgeen (extra) veiligheidsrisico's met zich mee brengt. Dit maakt mierenzuur aantrekkelijk voor het gebruik in brandstofcellen. Brandstofcellen op mierenzuur worden toegepast in EOS'en, de benaming hiervoor is mierenzuurgenerator. Het gebruik van mierenzuur is echter niet geheel zonder risico's, aangezien het ontvlambaar en ook toxisch is.

Mierenzuur is een ontvlambare vloeistof met een vlampunt van 50 °C. Het is daarnaast toxisch en (zwak) bijtend. Mierenzuur wordt in een mierenzuuraggregaat omgezet naar waterstof en CO₂. Deze CO₂ komt vrij in de lucht en de waterstof wordt gebruikt om elektriciteit op te wekken met behulp van een brandstofcel.

²⁰ Ook wel: methaanzuur

In het scenarioboek van NIPV wordt een toxisch scenario uitgewerkt van een aggregaat met 3000 liter mierenzuur (NIPV, 2024a). Hieruit blijkt dat als in deze tank een gat ontstaat waardoor alle mierenzuur in een eronder staande opvangbak van 7 m² stroomt er tot op ca. 3 m van de (rand van de) opvangbak concentraties aanwezig kunnen zijn die bij een half uur blootstelling letaal letsel kunnen veroorzaken. Dit zijn omstandigheden (rustig weer) waarbij het mierenzuur dat uit de vloeistof verdampt nauwelijks wordt gemengd met de omgevingslucht, waardoor personen benedenwinds aan relatief hoge concentratie worden blootgesteld.

Indien deze opvangbak met mierenzuur ontsteekt kan de hittestraling van de, ca. 1,5 m hoge, vlammen tot op 2 m van de rand van de bak tot derdegraads brandwonden leiden (berekend met EFFECTS versie 12). Ter vergelijking, indien in deze bak diesel had gezeten zou deze afstand ca. 6 m hebben bedragen, met vlammen van ruim 4 m hoog.

Deel II – Logistiek

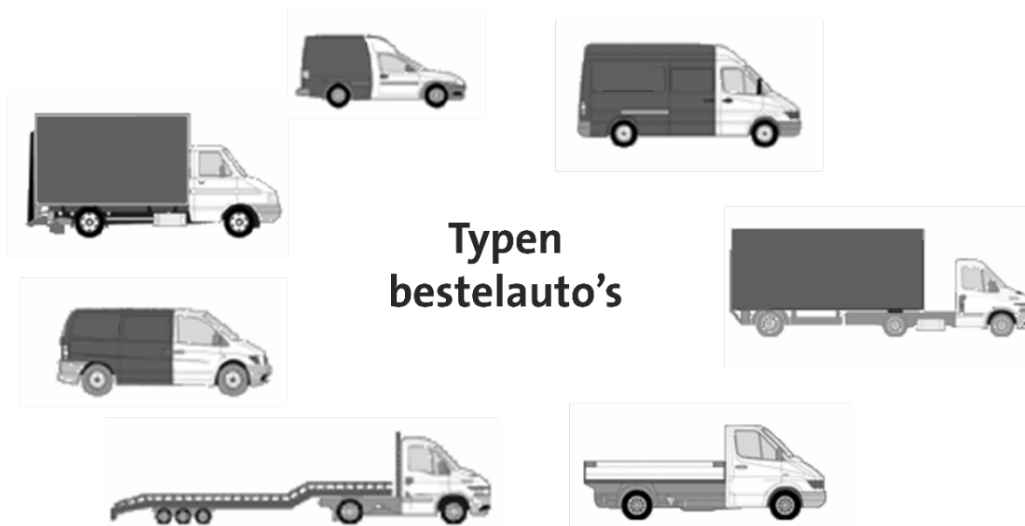
4 Systeembeschrijving zero-emissiematerieel in de logistiek

4.1 Voertuigcategorieën

Logistiek in deze studie heeft betrekking op voertuigen uit voertuigcategorieën N1, N2 en N3. De RDW (Rijks Dienst Wegverkeer) definieert deze categorieën als “motorvoertuigen op 4 of meer wielen, ontworpen en gebouwd voor het vervoer van goederen” (RDW, z.d.). Deze drie categorieën zijn onderverdeeld naar gewichtsklasse, zoals aangegeven in de eerste twee kolommen van Tabel 4.1. De gewichtsklasse hangt over het algemeen samen met de grootte van het voertuig. Voorbeelden van categorie N1 (bestelwagens) zijn weergegeven in Figuur 4.1 en voorbeelden van categorieën N2 en N3 (vrachtwagens) in Figuur 4.2 (SWOV, 2020).

Tabel 4.1 Indeling van logistieke voertuigen met laadvermogens (DNV, 2022).

Categorie	Gewicht (kg)	Gemiddeld laadvermogen (kW)	Capaciteit (kWh)	Voertuigtype
N1	<3500	Standaard: 7-22 (AC) Snel: 150-350 (DC/HPC)	40-100	> Lichte bedrijfsauto > Bestelwagen
N2	3500 – 12.000	Standaard: 50-150 (DC/HPC) Snel: 150-350 DC/HPC	100-250	> Lichte vrachtwagens > Bakwagen > Vrachtwagen
N3	>12.000	50-350 (DC) Mogelijk tot 1-4 MW	125-600	Zware vrachtwagens > Trekker met oplegger



Figuur 4.1 Voorbeelden van typen bestelauto's (voertuigcategorie N1) (SWOV, 2020)

	Bakwagen Maximum lengte: 12,00 m Maximum breedte: 2,55 m
	Trekker-opleggercombinatie De oplegger heeft geen eigen vooras en leunt als het ware op de trekker Maximum lengte: 16,50 m Maximum breedte: 2,55 m
	Trekker-aanhangwagencombinatie Maximum lengte: 18,75 m Maximum breedte: 2,55 m
	Langere en Zwaardere Vrachtautocombinatie Maximum lengte: 25,25 m Maximum breedte: 2,55 m

Figuur 4.2 Voorbeelden van typen vrachtauto's (voertuigcategorieën N2 en N3) (SWOV, 2020)

4.2 Batterij-elektrisch aangedreven voertuigen

De aanwezigheid van batterijpakketten en een elektromotor (in plaats van een brandstoftank en verbrandingsmotor) vormen het voornaamste verschil met conventionele logistieke voertuigen die zijn voorzien van een interne verbrandingsmotor. Batterijcapaciteit en laadvermogen zullen groter zijn bij zwaardere voertuigen, zoals ook blijkt uit Tabel 4.1 waarin ook informatie wordt gegeven over de batterijen van deze voertuigen (DNV, 2022). Om evenwicht, stabiliteit en zoveel mogelijk ruimte te behouden bevinden batterijpakketten zich meestal op strategische locaties binnen de vrachtwagen. De locaties van de pakketten kunnen variëren per fabrikant, enkele voorbeelden van locaties zijn:

- > Onder het chassis
- > Tussen de framebalken

- > Onder de cabine
- > Achter de cabine

Voor sommige voertuigtypes kunnen er beperkingen zijn voor autowegen en autosnelwegen, waar alleen voertuigen zijn toegestaan die minimaal 50 resp. 60 kilometer per uur kunnen en mogen rijden. Dit geldt voor bijvoorbeeld lichte elektrische voertuigen, deze zullen voornamelijk van lokale wegen gebruik maken (zie Tabel 4.2).

Tabel 4.2 Voorbeelden zero-emissielogistiek voertuigen.

Categorie	Voertuig	Toepassing	Wegen	Opmerkingen
N1	Bestelauto	> Bouw en service-onderhoud > Bezorg- en pakketdiensten > Horeca	Alle wegen	De ANWB heeft een overzicht gemaakt van alle beschikbare elektrische bestelauto's (ANWB, n.d.).
		>		
N2	Vrachtwagen	> Verhuisdiensten	Alle wegen	
N3	Oplegger	> Bouwlogistiek > Bevoorrading > Vuilnisdiensten	Alle wegen	De Europese truckfederatie ACEA ²¹ heeft een lijst opgesteld van elektrische vrachtovertuigen (N3-categorie) van haar leden (opwegnaarzeb, n.d.).

De [ZETI tool](#) geeft een overzicht van alle wereldwijd beschikbare e-trucks (Drivetozero, z.d.).

4.3 Waterstof aangedreven voertuigen

Hoewel waterstof direct als brandstof in een verbrandingsmotor kan worden gebruikt, zijn momenteel waterstof aangedreven voertuigen (zo goed als²²) uitsluitend brandstofcel-elektrisch aangedreven. Het verschil met batterij-elektrisch aangedreven voertuigen bestaat hierin dat de energie niet uit een batterijpakket wordt gehaald, maar uit waterstof dat wordt gebruikt om elektriciteit op te wekken d.m.v. een brandstofcel. Niettemin is wel een batterijpakket aanwezig als buffer en om (tijdelijk) meer vermogen te kunnen leveren. Waterstof wordt opgeslagen onder hoge druk (350- 700 bar). Het is ook mogelijk om waterstof in cryogene vorm (d.w.z. in vloeibare vorm, diep gekoeld tot ca. -250 °C) mee te nemen in goed geïsoleerde tanks. Voor deze laatste vorm zijn, om zowel technische als economische redenen grote tanks vereist, waardoor deze toepassing alleen voor (grote) vrachtwagens geschikt is. Door de hogere energiedichtheid (kg/l) is deze vorm sowieso het meest geschikt voor (zwaar) transport over grote afstanden. Echter wordt dit nog niet commercieel aangeboden en er zijn nog geen tankstations voor.

²¹ European Automobile Manufacturers Association

²² MAN is voornemens trucks met een waterstofverbrandingsmotor te bouwen ([MAN hTGX, de waterstofvrachtwagen van MAN | MAN Nederland \(man-nederland.nl\)](#)).

Tabel 4.3 Enkele voorbeelden van waterstof-aangedreven voertuigen.

Categorie	Vermogen brandstofcel (kW)	Batterij-capaciteit	waterstoftank	Omschrijving
N1	45 kW	10,5 kWh	4.4 kg, 700 bar, opgeslagen in cilinders in bodem	Bestelwagen
N2, N3	250 kW	140 kWh	25 kg, 350 bar, opgeslagen in 5 cilinders achter cabine of tussen de chassisbalken	Trekker en Bakwagen
N3	onbekend	70 kWh	80 kg, opgeslagen in 2 tanks	Trekker met Oplegger (40 ton) (testvoertuig)

4.4 Laadinfrastructuur

4.4.1 Elektrische voertuigen

Voertuigen uit de categorieën N1, N2 en N3 kunnen gebruikmaken van laadinfrastructuur voor personen EV's, zowel AC²³ als DC²⁴. Voor de categorieën N2 en N3 werkt het technisch wel maar de reguliere laadinfrastructuur is niet altijd toegankelijk voor trucks. Het opladen vindt voornamelijk plaats op bedrijventerreinen. Over het algemeen geldt dat voor langzaam laden in categorie N3 laadvermogens tot 50 kW, categorie N2 laadvermogens tot 22 kW en voor categorie N1 laadvermogens tot 11 kW volstaan. Voor de categorieën N1 en N2 zijn vermogens tussen 50 en 350 kW benodigd voor snel laden (DNV, 2022). Voor het snel laden van een voertuig uit de categorie N3 zijn vermogens tussen de 400-1000 kW benodigd.

De Nationale Agenda Laadinfrastructuur (verder: NAL) zorgt ervoor dat de ontwikkeling van de laadinfrastructuur in Nederland aansluit bij de uitrol van alle soorten elektrisch vervoer. Zo ook voor de ontwikkeling van een laadnetwerk voor zware elektrische voertuigen. Middels de '[Laadkaart zwaar vervoer](#)' brengt de NAL laadpunten voor zware elektrische voertuigen in kaart. Op de kaart wordt onderscheidt gemaakt tussen de voertuigcategorieën N2 en N3. De N2-laadpunten zijn bedoeld voor zwaar vervoer en de N3-laadpunten voor het laden van vrachtwagens (Nationale Agenda Laadinfrastructuur, z.d.).

Voor de categorie N3 zijn vermogens tussen de 400-1000 kW benodigd voor snelladen. Bij elektrische bussen is dit mogelijk met een pantograaf. Er bestaan reeds testtracés (o.a. tussen Lübeck en Hamburg) waarbij al rijdend via een pantograaf de batterij van een vrachtwagen kan worden bijgeladen. De verwachting is dat in de toekomst laadvermogens tussen de 1 en 4 MW haalbaar zijn.

²³ AC = wisselstroom.

²⁴ DC = gelijkstroom.

Afhankelijk van het aantal stops, de af te leggen afstand en de mogelijkheden om tussentijds bij te laden worden ritprofielen opgesteld. Hiervoor zijn drie mogelijkheden (Handreiking logistiek laden, 2020):

1. Niet bijladen: de batterij is groot genoeg om niet tussentijds te hoeven laden.
2. Extra laadstop: er moet tussentijds bij een laadpaal bijgeladen worden. Een snellader is gewenst.
3. Laden bij de klant: het voertuig moet tussentijds bij een of meerdere klanten worden bijgeladen. Ook hier is snelladen gewenst.

Laden kan op zowel publieke en private locaties, Tabel 4.4 geeft een overzicht van mogelijke laadlocaties. Het is locatieafhankelijk of snelladen tot de mogelijkheden behoort.

Tabel 4.4 Publieke en private laadpunten (NKL, 2020)

Terrein	Toegankelijkheid	Locatie	Voertuig categorieën
Privaat	Onder voorwaarden voor derden ²⁵ . Bijvoorbeeld voor een chauffeur van een ander transportbedrijf.	Depot	N1, N2 en N3
		Bedrijventerrein	N1, N2 en N3
		Distributiecentrum	N1, N2 en N3
Publiek	Voor iedereen toegankelijk.	Verzorgingsplaatsen langs de snelweg	N1, N2 en een deel voor N3
		Laadpleinen	N1, N2 en een deel voor N3

4.4.2 Waterstof

Waterstof (in gasvorm) kan op 24 locaties in Nederland worden getankt²⁶. Zij vormen vaak onderdeel van reeds bestaande tankstations. Commerciële tankstations voor vloeibaar waterstof zijn er (nog) niet in Nederland.

4.5 Ongevallencasuïstiek

In deze paragraaf worden incidenten behandeld met in de logistiek gebruikte zero-emissievoertuigen met als doel hier leerpunten uit te halen. Dit wordt gedaan door een omschrijving te geven van:

- > Het incident
- > De incidentbestrijding

Er is hierbij van de volgende informatiebronnen gebruik gemaakt:

- > Mediaberichtgeving
- > Database incidenten met alternatief aangedreven voertuigen van het NIPV
- > Incidenten database van 'EV FireSafe'

²⁵ Indien een privaat laadpunt onder voorwaarden voor derden toegankelijk is, wordt gesproken over een semi-publiek laadpunt (Handreiking logistiek laden, 2020)

²⁶ Ten tijde van mei 2025

- > Tips van contactpersonen bij veiligheidsregio's die betrokken waren bij of kennis hadden van incidenten met zero-emissiematerieel op bouwplaatsen en in de logistiek.

Vereisten voor de behandelde casussen waren dat:

- > Het batterijpakket of de waterstofinstallatie bij het incident betrokken was.
- > Het voertuig tot een van de in de inleiding besproken categorieën behoort.

4.5.1 Brand elektrische bezorgauto

In het verleden hebben zich in Nederland een aantal incidenten voorgedaan met kleine elektrische bezorgauto's van een boodschappenbezorgdienst. De informatie over dit incident is verkregen uit de EV Firesafe Database, de incidentenkaart van de Brandweer Brabant-Zuidoost over de inzet en een [YouTube-video](#) van 'Trainen en Oefenen Brandweer VRBZO'²⁷ (VRBZO, 2022). De video werd gemaakt als toelichting van de toegepaste blusmethode.

Beschrijving incident

Het incident vond plaats op 4 juni 2022 in een loods in Eindhoven, op het bedrijventerrein van een bezorgdienst waar de bezorgvoertuigen worden opgeladen. Ten tijde van het incident waren er ongeveer 15 elektrische bezorgvoertuigen gestald. De rook verspreidde zich snel door de loods. Toen het personeel dit ontdekte werd de loods direct ontruimd. De bron van de rookontwikkeling bleek een van de elektrische bezorgvoertuigen te zijn. Het personeel trok de laadstekker uit het voertuig tijdens de ontruiming. De rookontwikkeling werd door betrokken brandweermensen als sterk en pulserend beschreven.

Incidentbestrijding

De brandweer arriveerde snel en verplaatste het brandende voertuig naar buiten. Dit was relatief eenvoudig omdat het een relatief licht bedrijfsvoertuig was en de contactsleutel die benodigd was voor het openen van het stuurslot aanwezig was. De rook werd uit de loods verdreven met een ventilator.

Buiten bleef het batterijpakket roken (Figuur 4.3). Met een warmtebeeldcamera werd een verhoogde temperatuur in het batterijpakket gemeten. Een manier om een elektrisch voertuig te stabiliseren bij thermal runaway is door het volledig onder te dompelen in een met water gevulde container. Hoewel een dompelcontainer werd aangevraagd door de brandweer, werd deze door onbekende omstandigheden niet aangeleverd.

Derhalve werd een alternatieve blusmethode toegepast (Figuur 4.4). De Brandweer Brabant-Zuidoost heeft deze alternatieve blusmethode toegelicht in een [YouTube-video](#) (VRBZO, 2022). Het gaat erbij om het koelen van het batterijpakket door direct water in te spuiten. De vloerplaten van het transportdeel van de auto werden verwijderd om toegang te krijgen tot de batterij. Onder een aluminium beschermplaatje in de batterij zaten openingen waarin water gespoten kon worden. De temperatuur werd met een warmtebeeldcamera gemonitord. Het inspuiten van het water werd gestopt toen de temperatuur daalde en stabiel bleef, en weer gestart toen de temperatuur weer steeg.

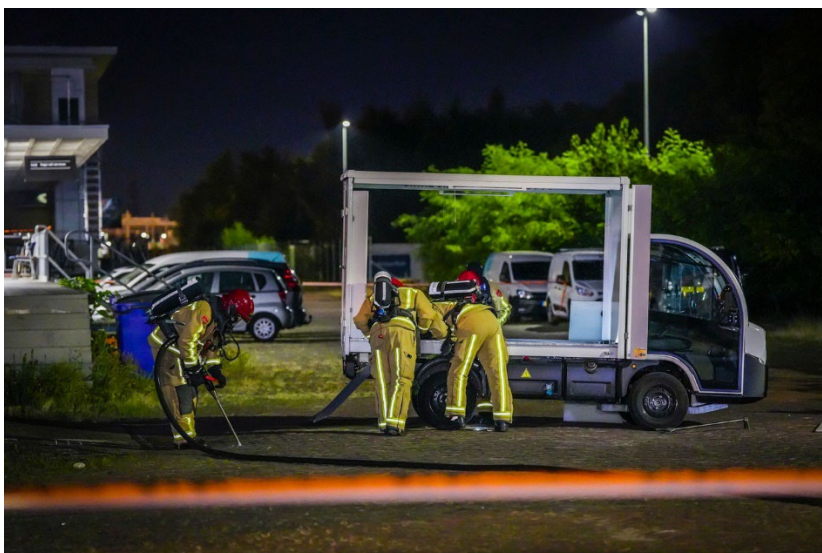
²⁷ Veiligheidsregio Brabant-Zuidoost.



Figuur 4.3 Rookontwikkeling uit het batterijpakket van de bezorgauto. (Bron: VRBZO)

Geleerde lessen

- > Bij dit incident was het direct inbrengen van water in het batterijpakket een goed alternatief voor het gebruik van een dompelcontainer om de effecten in te perken. De opening voor het inbrengen van water was bij dit incident toegankelijk. Echter is het onbekend of bezorgdiensten nog steeds dezelfde voertuigen in gebruik hebben en/of andere (zwaardere) voertuigtypes ook een inspuutopening in hun batterijpakketten hebben. Hierdoor is deze blusmethode mogelijk niet voor alle voertuigtypes toepasbaar.
- > De auto moest zo snel mogelijk losgekoppeld worden van het laadpunt, en de noodstop aan het laadpunt moet gebruikt worden. Tijdens dit incident werd dit door het personeel gedaan. Er was echter al rookontwikkeling te zien. De rook bevat toxische gassen. Daarom wordt aangeraden het afkoppelen van de laadstekker aan de brandweer over te laten. Zij benaderen het voertuig met adembescherming. Het personeel moet wanneer rook zichtbaar is zo snel mogelijk ontruimen.
- > Voor het verplaatsen van het voertuig is een contactsleutel benodigd waarmee het stuurslot worden ontgrendeld. Zorg dat deze in de buurt van het voertuig is.
- > Behandel de situatie als een Incident Bestrijding Gevaarlijke Stoffen (IBGS): de rook is giftig, dus houd 25 meter afstand en gebruik adembescherming in de hot zone.



Figuur 4.4 Brandweerinzet met toepassing van alternatieve blusmethode. (Bron: VRBZO)

4.5.2 Brand in elektrische vrachtwagen

De informatie over deze casus is verkregen middels een interview met twee personeelsleden van de brandweer in Kopenhagen die bij het incident betrokken waren (Hovedstadens Beredskab, HBR).

Beschrijving incident

Op de ochtend van woensdag 14 februari 2024 kreeg de brandweer van Kopenhagen een melding van een hevige brand in de cabine van een (ongeveer vijf jaar oude) elektrische vuilniswagen, die geparkeerd stond op een afgesloten terrein. De brand is waarschijnlijk ontstaan toen de cabineverwarming werd aangezet. Deze brand is geblust, waarmee het incident voor de brandweer was afgerond.

Echter, de brandweer werd even later opnieuw opgeroepen. Waarschijnlijk heeft de eerdere cabinebrand hitteschade veroorzaakt aan het bovenste deel van het batterijpakket, waardoor opnieuw brand ontstond. De batterij, die ongeveer 2,5 x 1,8 x 0,5 meter groot en 3.800 kg zwaar was, werd 's nachts opgeladen. Hoogstwaarschijnlijk was deze ten tijde van het incident volledig opgeladen.

Bij beide incidenten was er sprake van zware rookontwikkeling, die veel bedrijven in de omgeving trof. Als gevolg hiervan werden de hulpdiensten en de politie zwaar belast met evacuatie- en crisismanagementtaken.

Incidentbestrijding

Toen de brandweer de eerste keer ter plaatse kwam, stond de cabine al volledig in brand. Deze werd direct geblust met een C-slang en een hogedrukstraal met een debiet van ongeveer 300 liter bluswater per minuut.

Later werd de brandweer opnieuw opgeroepen vanwege rookontwikkeling uit het batterijpakket. Het betrokken brandweerpersoneel dat de tweede keer ter plaatse kwam, vermoedde dat de batterij niet in een thermal runaway was geraakt. Zij dachten eerder dat de plastics tussen de batterijmodules aan het branden waren. Er waren namelijk geen

‘ploppende geluiden’ van exploderende cellen te horen, wat bij een thermal runaway meestal wel het geval is.

De brandweer begon met het koelen van de batterij, zoals te zien is op de linker afbeelding in Figuur 4.5. Dit werd gedaan met een C-slang die een debiet van ongeveer 300 liter per minuut heeft. Dit bleek voldoende om een thermal runaway te voorkomen. Omdat de bluswatervoorziening in het gebied ontoereikend was, moest een extra waterwagen ter plaatse komen.

Het industriegebied rondom de incidentlocatie werd in samenwerking met de politie ontruimd. Werknemers van omliggende bedrijven werd gevraagd binnen te blijven en ventilatiesystemen uit te schakelen. Tijdens het incident gebruikte de brandweer een drone om de ingezette hulpdiensten een overzicht te geven.

De brandweer wilde het batterijpakket in een dompelcontainer plaatsen. Echter noch de eigenaar noch de hulpdiensten konden een container vinden die groot genoeg was voor het batterijpakket. Toevallig had de brandweer een contactpersoon bij een bedrijf dat het batterijpakket had geleverd. Deze contactpersoon heeft een technicus gestuurd die het batterijpakket onder toezicht van de brandweer uit elkaar kon halen. Op de rechterafbeelding in Figuur 4.5 is te zien hoe het batterijpakket van de vuilnistruck wordt getakeld.



Figuur 4.5: Koelen en demontage van het batterijpakket. (Bron: [Facebook post brandweer Kopenhagen](#))

Na de demontage werden de kleinere fragmenten in een dompelcontainer geplaatst. In Figuur 4.6 is aan de linkerkant het batterijpakket na de ontmanteling te zien. Aan de rechterkant is de cabine van de vrachtwagen na het incident te zien.



Figuur 4.6: Het batterijpakket na de demontage en de cabine na de inzet. (Bron: [Facebook post brandweer Kopenhagen](#))

De inzet was volgens betrokkenen erg arbeidsintensief. Meerdere commandanten, twee brandweerkorpsen, hulpverleners van de gemeente en de politie van Kopenhagen moesten ter plaatse komen. De totale duur van zowel de cabine- als de batterijbrand was acht uur.

Geleerde lessen

Het incident illustreerde de complexiteit van batterijbranden van grote voertuigen en bestrijding ervan:

- > Herontsteking van een (batterij)brand, enige tijd nadat deze geblust is (of lijkt)
- > Voertuig en / of batterijpakket passen niet in een dompelcontainer; demontage is noodzakelijk
- > Het is noodzakelijk om veel bluswater voorradig te hebben
- > Het incident leidt tot significante overlast voor de omgeving en vraagt een langdurige en arbeidsintensieve inzet van hulpdiensten.

Succesvolle demontage was mogelijk door enkele gelukkige (toevallige) omstandigheden:

- > een brandweerman kende de producent van het batterijpakket zodat deze een deskundige technicus naar de locatie kon sturen om het batterijpakket te demonteren
- > het batterijpakket was op een toegankelijke plaats gemonteerd en kon relatief gemakkelijk (in zijn geheel) worden verwijderd
- > tijdens demontage trad geen herontbranding van het batterijpakket op.

Mede naar aanleiding van dit incident is in hoofdstuk 7 demontage als een onderdeel van incidentmanagement opgenomen en uitgewerkt.

5 Voorbeeldscenario's logistiek

In dit hoofdstuk worden aan de hand van drie voorbeeld-incidentscenario's de mogelijke effecten en de impact op de omgeving van incidenten met zero-emissiematerieel in de logistiek bepaald, waarmee antwoord wordt gegeven op de vragen 1 en 2 uit de doelstelling. Zoals beschreven in deel I, paragraaf 2.4 van deze studie vormt de thermal runaway het belangrijkste risico van het gebruik van lithium-ion batterijen. Deze leidt tot oververhitting van een batterij(pakket), met mogelijk de volgende effecten:

- > Vrijkomen van toxische en brandbare gassen
- > Brand in het batterijpakket en branduitbreiding naar naburige pakketten en mogelijk de omgeving
- > Fakkels van batterijcellen en batterijpakketten met mogelijk ook brandoverslag naar de omgeving
- > Een explosie indien vertraagde ontsteking van opgehoopte brandbare gassen plaatsvindt.

Voor BEVs zal de reikwijdte van de effecten afhankelijk zijn van de grootte van het batterijpakket, de ladingstoestand (State of Charge), de (fysieke) opbouw van het batterijsysteem, alsook de wijze waarop het incident zich ontwikkelt. Welke gevolgen (schade, slachtoffers) dit heeft zal afhangen van de omgeving waarin het incident plaatsvindt. De nabijheid van brandbare objecten kan tot branduitbreiding leiden. Personen kunnen letsel oplopen door verbranding of inademing van toxische en / of hete gassen.

Voor wat betreft waterstof aangedreven FCEV-voertuigen (Fuel Cell Electric Vehicles) en H₂-ICE-voertuigen (Hydrogen Internal Combustion Engines) vormen de hogedrukcilinders met waterstof een belangrijk brandrisico. Voor de FCEV vormt ook het accupakket een risico, alsook de mogelijke wederzijdse interactie. Indien een vulinstallatie aanwezig is (bijvoorbeeld een trailer met waterstofcilinders) zal ook deze een risico vormen. De volgende effecten kunnen optreden met waterstof:

- > Fakkelflam als gevolg van verhitting van de tank van buitenaf waardoor het veiligheidsventiel gaat afblazen en het afgeblazen gas ontsteekt. In dit scenario is het waterstof niet de oorzaak van de brand.
- > Gaswolkexplosie indien waterstofgas lekt, zich ergens ophoopt en ontsteekt.

De reikwijdte zal afhangen van inhoud van en druk in de opslagtank, de grootte van het gat waaruit het gas ontsnapt (zie ook Tabel 6.3), aanwezigheid van ontstekingsbronnen en uiteraard ook weer de omgeving.

Relevante aspecten voor het verloop van incidentscenario's zijn:

- > Wel of niet opladen van de batterij van het voertuig, aangezien laden een verhoogd risico voor oververhitting en (interne) beschadiging van de accu met zich meebrengt.
- > Omgeving die beschadiging in de hand werkt (veel voertuigbewegingen, variabele inrichting);

- > Nabijheid van “kwetsbare” elementen en of personen:
 - Brandbare elementen (bouwwerken, lading, opgeslagen materialen) of tot domino-effecten leidende elementen (accu's nabij waterstofcilinders bijvoorbeeld)
 - bebouwde dan wel meer landelijke omgeving.
- > Energie-inhoud van de risicobron (accu, waterstoftank, brandlast van het voertuig); deze zal uiteraard van invloed zijn op reikwijdte van de effecten.
- > Mate van omslotenheid van de omgeving (binnen of buiten); dit in verband met de kans op een explosie en mogelijk ook ontstaan van hoge concentraties toxische gassen. In ruimtes binnen kunnen vluchtweg-mogelijkheden ook aandacht vragen.

De volgende drie hypothetische incidentscenario's zijn in overleg met de begeleidingscommissie vastgesteld:

1. Trekker-opleggercombinatie met brandbare lading (BEV, N3) die betrokken raakt bij een aanrijding op een kruispunt, waarbij brand ontstaat in de brandbare lading;
2. Vrachtauto (BEV) op een distributiecentrum waarbij tijdens het laden een thermal runaway ontstaat, met risico op branduitbreiding naar nabij geparkeerde voertuigen;
3. Waterstofvuilniswagen in de bebouwde omgeving (FCEV, N2/N3), waarbij door brand in de lading de waterstoftank wordt aangestraald, met activering van het thermisch overdrukventiel (TPRD) als gevolg.

5.1 Brand elektrische vrachtwagen

5.1.1 Omschrijving

Een BEV categorie N3 trekker – oplegger combinatie (zie Figuur 5.1) is beladen met circa 20 ton brandbare lading. Een automobilist ramt de batterijpakketten aan de rechterzijde van de truck. Deze raken beschadigd, beginnen te roken en ontbranden, waardoor een thermal runaway ontstaat. Na korte tijd staat de gehele vrachtauto in brand. Langs de weg staan struiken en bomen en enkele geparkeerde auto's die mogelijk vlam kunnen vatten.



Figuur 5.1 N3 trekker oplegger combinatie in voorbeeldsysteem 2 (Scania, 2024)

Karakteristieken

Enkele karakteristiek van dit incident zijn:

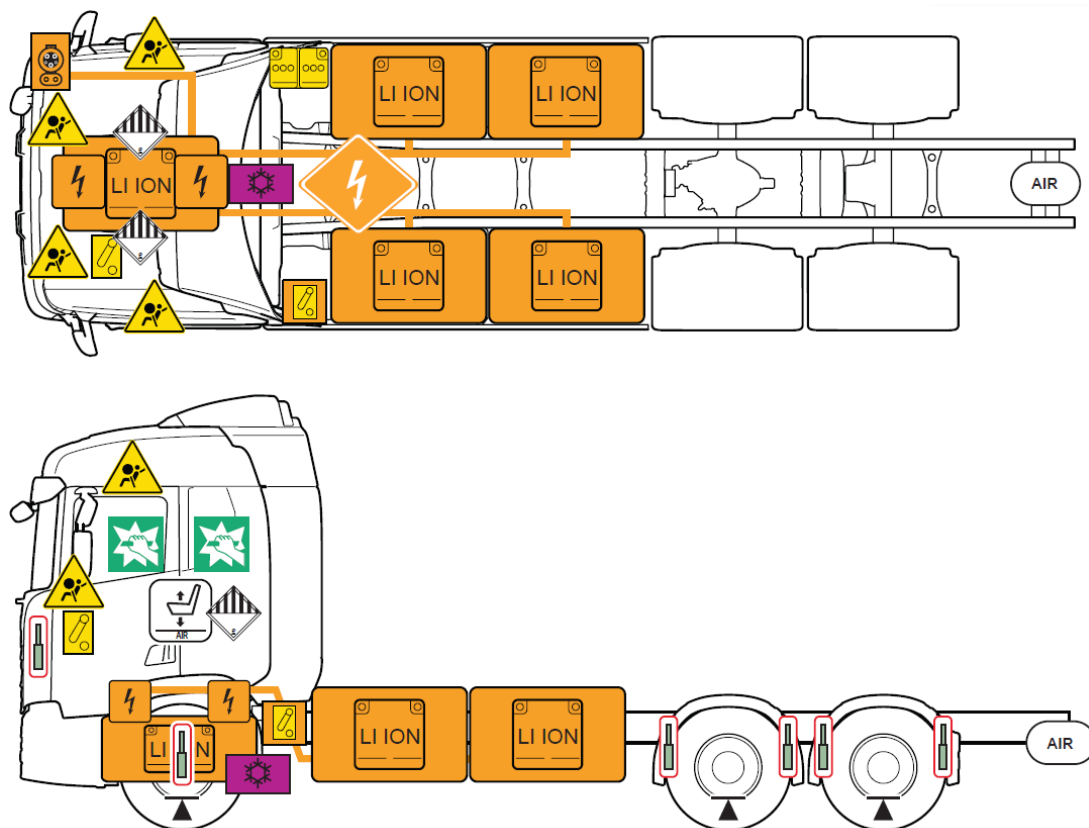
- > Het betreft één vrachtwagen;
- > Deze bevindt zich op openbare weg in de bebouwde kom: gebouwen, huizen, personen, begroeiing kunnen dichtbij zijn.
- > Er is druk om het kruispunt weer snel vrij te maken; hierdoor moet berging mogelijk plaats vinden terwijl het risico voor herontbranding (na aanvankelijke blussing) van de batterij nog aanwezig is

5.1.2 Uitwerking effecten

Voor het berekenen van de effectafstanden zijn onderstaande invoerparameters gebruikt.

Technische gegevens truck en overige kenmerken

- > Batterijcapaciteit: 520 kWh (>50% opgeladen, thermal runaway met directe ontsteking is mogelijk); opgebouwd uit 5 pakketten van 104 kWh zoals aangegeven in Figuur 5.2 (Scania, 2025).
- > Totale lading: 20 ton, vrachtwagen is volledig beladen.



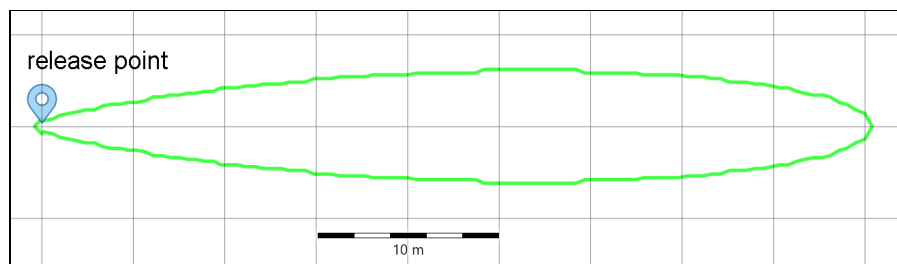
Figuur 5.2 Locatie 5 batterijpakketten (Scania, 2025)

Toxisch

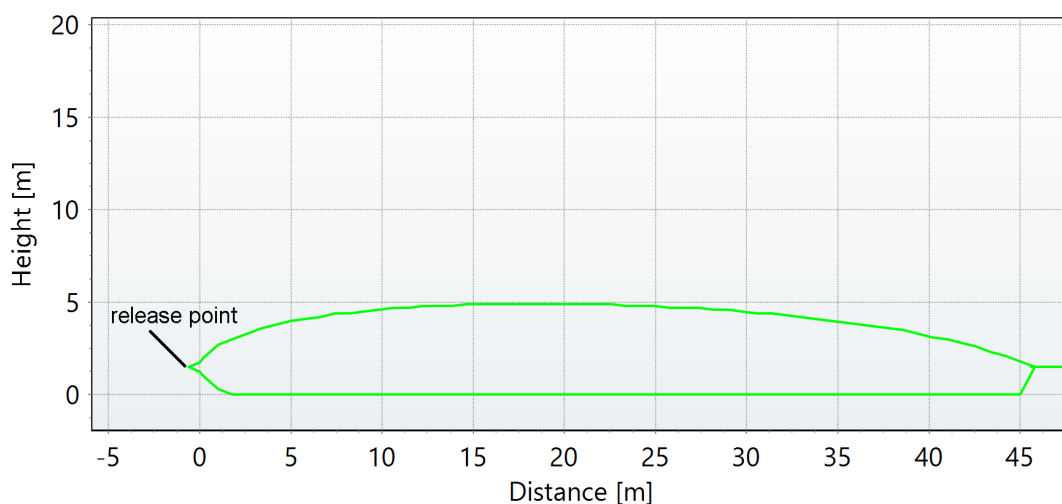
Voor de toxische gevolgen is uitgegaan van blootstelling aan waterstoffluoride (HF). Op basis van eerdergenoemde technische - en omgevingsdata zijn onderstaande invoergegevens gebruikt voor de berekeningen.

Er wordt aangenomen dat twee batterijpakketten in thermal runaway raken en toxische gassen vormen. Vrijgekomen hoeveelheid HF: 285 mg /kWh (Gexcon 2024: THEORETICAL BACKGROUND – Li-ion Battery Storage – Thermal Runaway) uit 2 batterijpakketten van ieder 104 kWh in 10 minuten; dus in totaal: $0.285 \times 104 \times 2 = 59$ gram. Er is hierbij uitgegaan van LFP-type batterijen. Uit [onderzoek van RIVM](#) blijkt dat na 10 tot 20 minuten meer dan de helft van het waterstoffluoride uit de rook is verdwenen, doordat het zich bindt aan andere stoffen en rookdeeltjes. Daarom is de helft van hetgeen is vrijgekomen meegenomen in de dispersieberekeningen. Voor de dispersieberekeningen is uitgegaan van een verstedelijkte (licht bebouwde) omgeving. Voor atmosferische omstandigheden is Pasquillklasse D5 (D = neutrale atmosfeer, 5 = windsnelheid 5 m/s) gebruikt. Deze wordt in Nederland, vaak als representatief genomen voor overdag. As afstandscriterium zal genomen worden de afstand waarop de concentratie van HF in de lucht is afgenomen tot de levensbedreigende waarde bij 10 minuten blootstelling. Dit is 150 mg/m³ (RIVM, 2021), gemeten op “neushoogte” (1,5 m).

De resultaten van de berekeningen zijn in onderstaande figuren weergegeven. In Figuur 5.3 en Figuur 5.4 is de omvang van de wolk (de 150 mg/m³ contour) weergegeven. Hieruit blijkt dat de afstand tot de LBW₁₀-concentratie ca. 45 m bedraagt. Voor 1 minuut blootstelling is de LBW-waarde 938 mg/m³. Deze ligt op 12 m vanaf het punt waar de HF vrijkomt.



Figuur 5.3 Bovenaanzicht toxische wolk HF (150 mg/m³ contour).



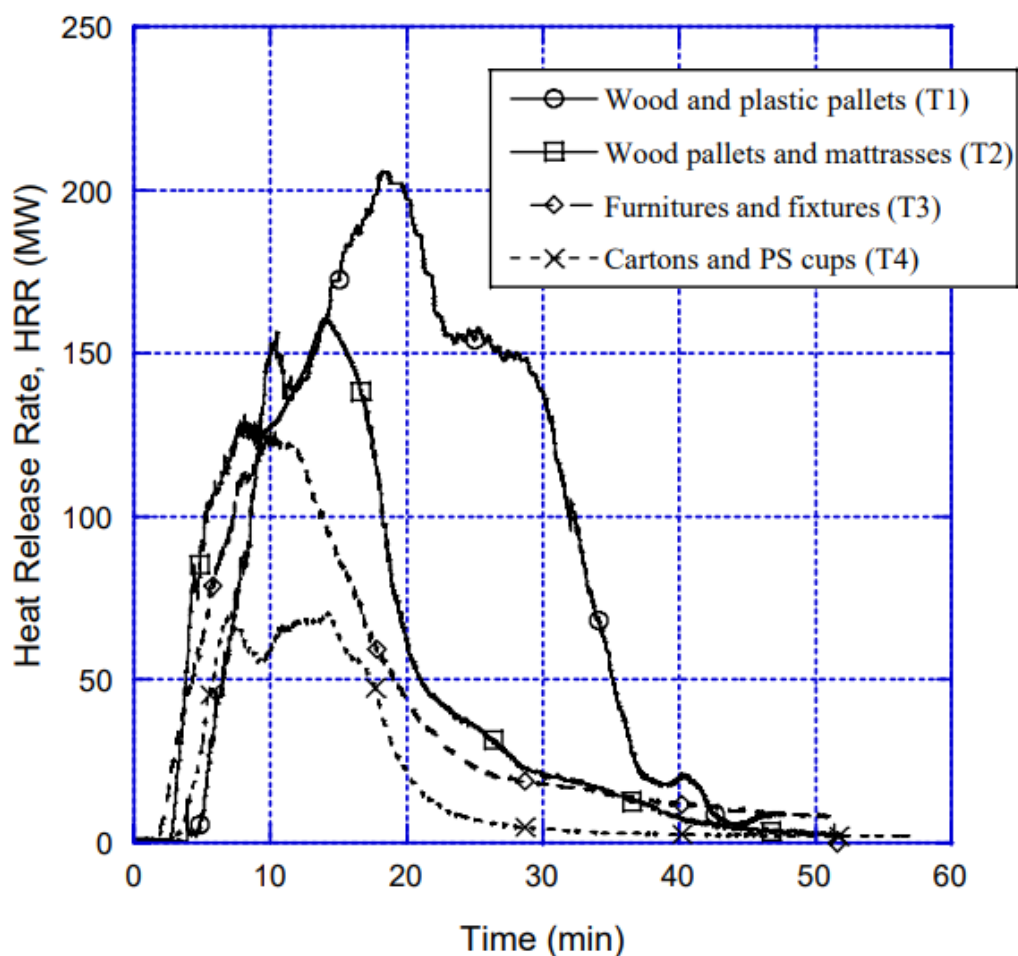
Figuur 5.4 Zijaanzicht toxische wolk HF (150 mg/m³ contour).

Brand / warmtestraling

De stralingswarmte van de brandende vrachtauto met lading kan tot branduitbreiding in de omgeving leiden. De berekeningen zijn uitgevoerd met een door NIPV ontwikkeld model. Hierin wordt de stralingswarmte rondom een brandend voorwerp berekend als functie van de afstand tot het brandende oppervlak op basis van een 'solid flame' model. Belangrijke invoerparameters zijn:

- > Heat Release Rate (HRR), ofwel het brandvermogen van het brandend voorwerp
- > Fractie van de totale energie die als straling wordt afgegeven
- > Lengte en breedte van het brandende voertuig
- > Transmissiviteit van lucht (het deel van de straling dat niet door de lucht wordt geabsorbeerd).

Door SP in Zweden zijn enkele tientallen jaren geleden brandproeven uitgevoerd met modeltrailers van vrachtauto's beladen met brandbare goederen waarbij waardes voor de HRR zijn gemeten. De experimenten vonden plaats in de Runehamer tunnel in Noorwegen. De resultaten van de HRR bepalingen van de (vier) experimenten zijn weergegeven in Figuur 5.5. (Ingason, H., Lönnemark, A. 2005).



Figuur 5.5 Resultaten HRR-bepalingen van brandproeven met beladen modellen van vrachtautotrailers (Ingason & Lönnemark, 2005)

Een aantal gegevens van de tests is weergegeven in Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Gegevens Runehamer brandproeven (Ingason & Lönnemark, 2005)

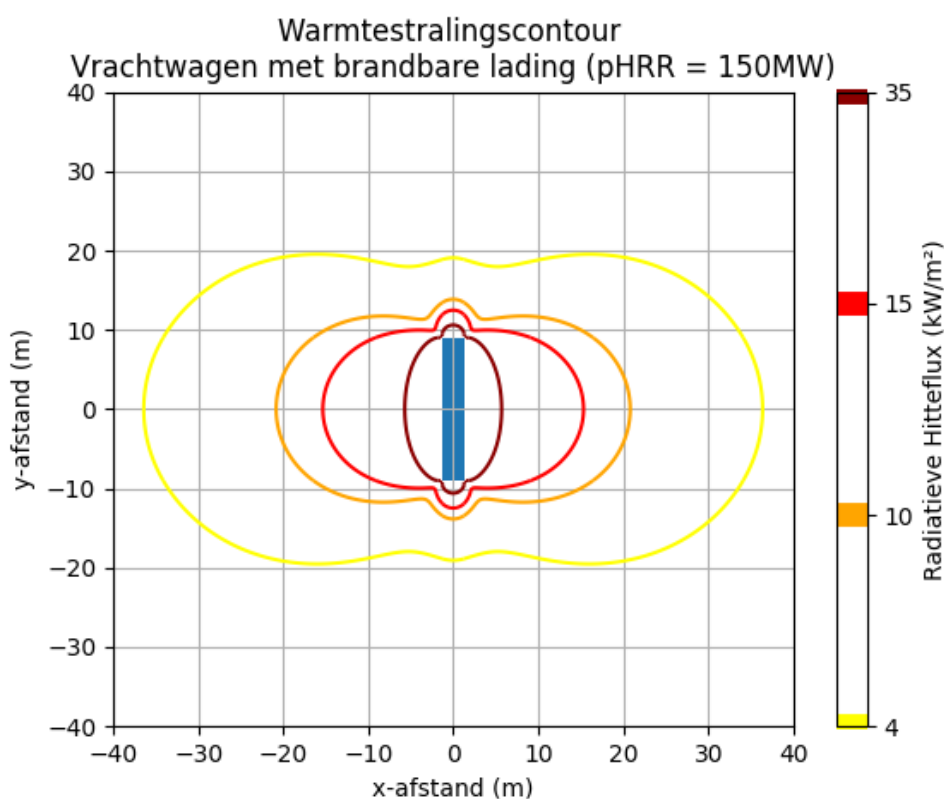
test	Massa brandbare goederen (ton)	pHRR MW)	Tijd tot pHRR (min)
T1	11	202	18,5
T2	6,9	157	14,1
T3	8,5	119	10,0
T4	2,9	66	7,4

Uit de data blijkt dat een grotere massa aan brandbare goederen in het algemeen tot een hogere pHRR leidt en dat deze op een steeds later tijdstip wordt bereikt. Test T1 komt het meest overeen met de voorbeeldcase (20 ton goederen waarvan de helft brandbaar). De pHRR wordt bereikt op bijna 20 minuten. Als we ervan uitgaan dat de brandweer na ca. 10 minuten aanwezig is en gaat blussen, zal HRR niet boven de 150 MW komen (zie Figuur 5.5). Bij zowel T1 als T2 bereikt de HRR deze waarde na ca. 10 minuten. Deze waarde van 150 MW is dan ook gebruikt om de maximale stralingswarmte te bepalen met het NIPV model.

Verder zijn dezelfde waardes gebruikt voor de modelberekeningen als voor de vrachtauto in (NIPV, 2024):

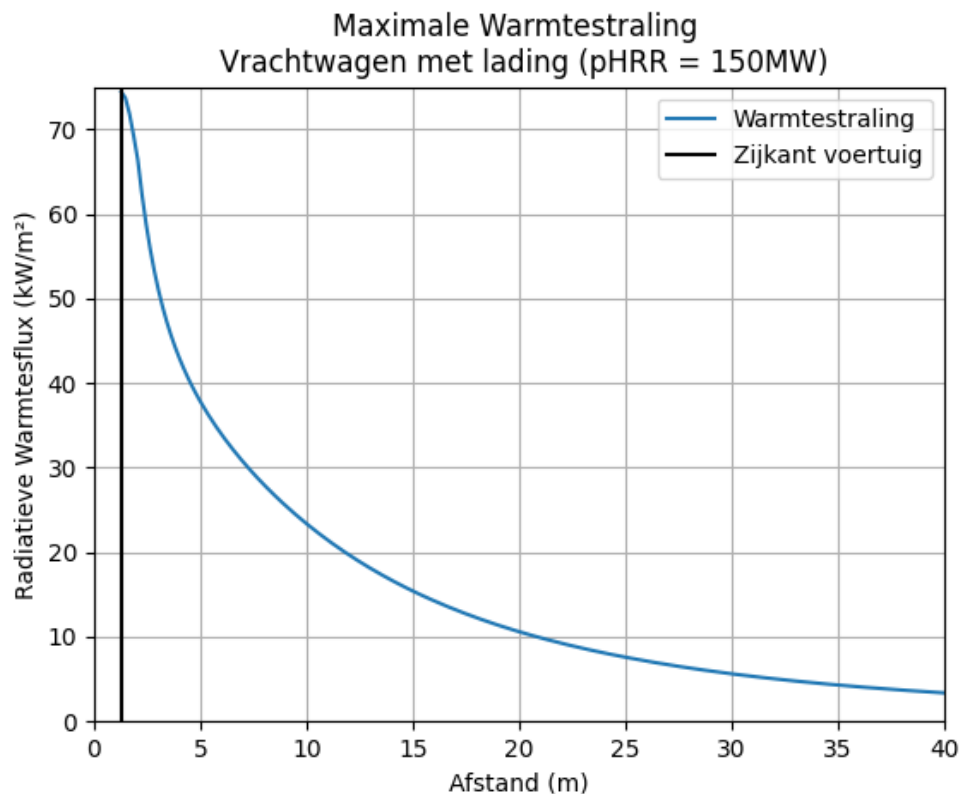
- > Stralingsfractie: 0,45
- > Lengte x breedte voertuig: 18 m x 2,55 m;
- > Transmissiviteit van lucht = 1 (lucht absorbeert geen straling).

Voor vier stralingsniveaus zijn contouren rond het voertuig weergegeven in Figuur 5.6. Een warmtestralingsniveau van 35 kW/m² of meer zal direct tot letaal letsel leiden. Ook wordt ervan uitgegaan dat bij dit stralingsniveau secundaire branden ontstaan. Echter hout en kunststoffen kunnen al bij 15 kW/m² ontbranden. Bij blootstelling aan stralingsniveaus van minder dan 10 kW/m² zal men in het algemeen nog in staat zijn om te vluchten, zodat geen letaal letsel zal optreden. Een stralingsniveau van 4 kW/m² wordt als grens gehanteerd voor het optreden van de brandweer met beschermende brandweerkleding, die voldoet aan NEN-EN 469.



Figuur 5.6 Warmtestralingscontouren (elektrische) vrachtwagen met brandbare lading

De warmtestraling als functie van de afstand tot de vrachtwagen is weergegeven in Figuur 5.7 berekend op 1,5 m hoogte en in het midden naast de vrachtauto (y=0 in Figuur 5.6).



Figuur 5.7 Warmtestraling versus afstand tot hartlijn vrachtwagen met lading

De vlamhoogte is ca 19 m. In Tabel 5.2 zijn de effectafstanden samengevat, gerekend vanaf de zijkant van de vrachtauto (de verticale lijn op 1,25 m in Figuur 5.7).

Tabel 5.2 Afstand waarop verschillende stralingsniveaus worden bereikt

Stralingsniveau (kW/m2)	Afstand tot zijkant voertuig (m)
35	4.4
15	14
10	20
4	35

Uit de figuren en berekeningen kan worden geconcludeerd dat binnen 4 à 5 m van de truck direct brandoverslag zal optreden en personen direct letale verwondingen zullen oplopen. Tot op 14 m kunnen objecten met brandbare delen (kunststof, hout) vlam vatten.

Explosie

Het is mogelijk dat vrijgekomen brandbare gassen vertraagd ontsteken met een wolkbrand of dampwolkexplosie tot gevolg. In het bijzonder dient hiermee rekening te worden gehouden als zich brandbare gassen hebben opgehoopt in de chauffeurscabine of laadruimte. Deze kunnen namelijk plotseling leiden tot een explosie.

5.2 Elektrische vrachtwagenbrand bij depot

5.2.1 Omschrijving

In het vorige scenario zijn de effecten besproken van een elektrische vrachtwagenbrand met (brandbare) lading. Doordat er op een distributiecentrum doorgaans meerdere vrachtwagens dicht bij elkaar staan geparkeerd én van mogelijke (brandbare) lading zijn voorzien, bestaat er een kans dat de brand zich uitbreidt naar naburige vrachtwagens. Wanneer de vrachtwagens tijdens het laden ook gedockt staan aan het distributiecentrum zelf dient ook rekening gehouden te worden met het scenario dat de brand zich uitbreidt naar de gebouwen.



Figuur 5.8: Opladen van elektrische vrachtauto's bij depot (Virta, z.d.).

Karakteristieken

Enkele karakteristiek van dit incident zijn:

- > Er staan meerdere vrachtauto's dicht bij elkaar tijdens het laden van één of meerdere voertuigen
- > Dit kan binnen het geval zijn of ook
- > Buiten, mogelijk bij de terreingrens of bij brandbare elementen.

5.2.2 Uitwerking effecten

In dit scenario wordt er van uit gegaan dat een elektrische vrachtauto op een laadplek bij een distributiecentrum is aangesloten op een snellaadpunt. Tijdens het laadproces ontstaat er in het batterijpakket een thermal runaway, een zichzelf versterkend proces waarbij batterijcellen snel en ongecontroleerd opwarmen. Een thermal runaway van een elektrische vrachtauto kan diverse oorzaken hebben (Zie ook Deel I, paragraaf 3.2), waaronder:

- > Mechanische beschadiging van batterijcellen tijdens eerder gebruik, bijvoorbeeld door trillingen, schokken, eerdere aanrijdingen of verkeerd gebruik.
- > Interne kortsluiting door inwendige veroudering (dendrietvorming of plating) of productiefout van een batterijcel.
- > Oververhitting door hoge laadstromen tijdens snelladen, die bijvoorbeeld door warm weer of defecte koelsystemen niet goed wordt afgevoerd, of een externe brand

- > Elektronische storing in Batterij Management Systeem (BMS), waardoor veilige temperatuur- en laadlimieten worden overschreden.

Door de warmteontwikkeling raakt het batterijpakket ernstig beschadigd, met als gevolg het vrijkomen van brandbare (en ook toxische) gassen. Deze ontsteken waardoor al gauw de gehele vrachtauto vlam vat. In het vorige voorbeeldscenario is uitgerekend dat tot op 14 m brandoverslag zal optreden (bij deze, vrij grote, vrachtauto met oplegger met lading). Omdat op het terrein van het distributiecentrum meerdere elektrische vrachtauto's tegelijkertijd worden opgeladen (meestal dicht bij elkaar, zeg op ca. 1 m afstand) zal de brand zich uitbreiden naar naburige voertuigen (deze brandoverslag zal overigens ook optreden als een niet-elektrische vrachtauto in brand raakt).

Voor kleinere vrachtauto's of bezorgauto's zal overigens bij een dergelijke kleine onderlinge afstand ook brandoverslag optreden; zie bijvoorbeeld Tabel 6.2, waarin een overzicht is gegeven van de afstanden tot waarop brandoverslag zal optreden voor een aantal voer- en werktuigen, berekend met de formule uit (Brans et al., (2024)) die ook in het vorige voorbeeldscenario werd gebruikt.

Het gelijktijdig in brand staan van meerdere voertuigen zal leiden tot een verhoogd brandvermogen en mogelijk moeilijkere beheersbaarheid van het incident.

5.3 Waterstofvuilniswagen

5.3.1 Omschrijving

Bij een met behulp van een brandstofcel aangedreven waterstofvuilniswagen (N2/N3) gaat het veiligheidsventiel (de TPRD) van de waterstofgascilinders open doordat er brand ontstaat in de lading van de truck die een waterstoftank aanstraalt. De truck rijdt door een gebied met gebouwen op enkele meters afstand, zeg een drukke (winkel)staart met appartementen (Figuur 5.9).

Om uiteenbarsten van de tank te voorkomen zijn de waterstofcilinders voorzien van een veiligheidsventiel, een zogenaamd Thermally- activated Pressure Relief Device of TPRD. De uitstroomrichting van de TPRD is verticaal naar boven. De TPRD wordt geactiveerd bij 110 °C (of een eventueel ingestelde maximale druk). In dit voorbeeld zal er van worden uitgegaan dat de brand de TPRD aanstraalt van een van de waterstofcilinders. Het gevolg is dat de waterstof vanuit beide cilinders met hoge snelheid naar buiten wordt geblazen, ontsteekt en een fakkel vormt. De cilinders verliezen druk, waardoor de fakkellengte geleidelijk afneemt totdat de cilinders leeg zijn en druk gelijk is aan de omgevingsdruk, waarna de fakkel stopt.

Karakteristieken

Enkele karakteristiek van dit incident zijn:

- > Er ontstaat een verticale fakkel boven op de truck
- > Het incident speelt zich af in een druk bebouwde omgeving (bebouwde kom)



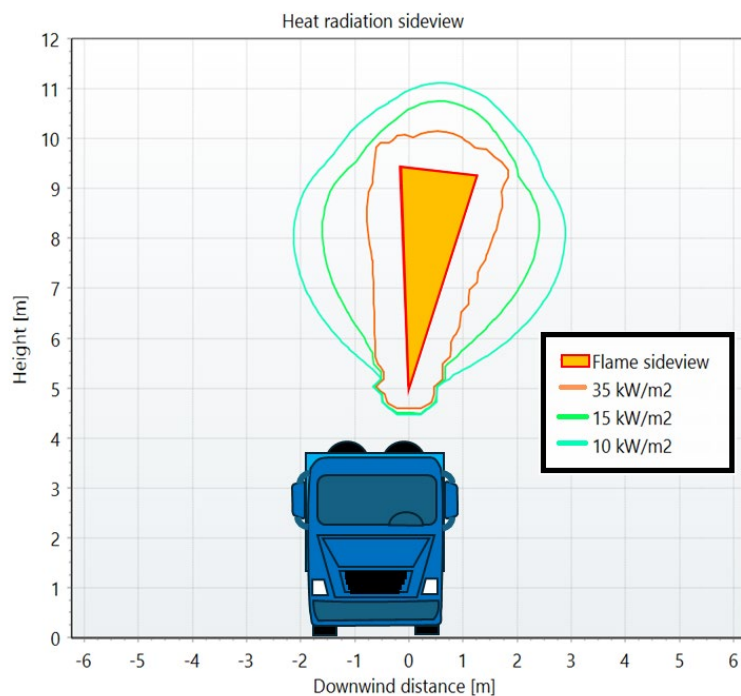
Figuur 5.9 Voorbeeld van een waterstof-vuilniswagen (waterstofnet, 2025)

5.3.2 Uitwerking effecten

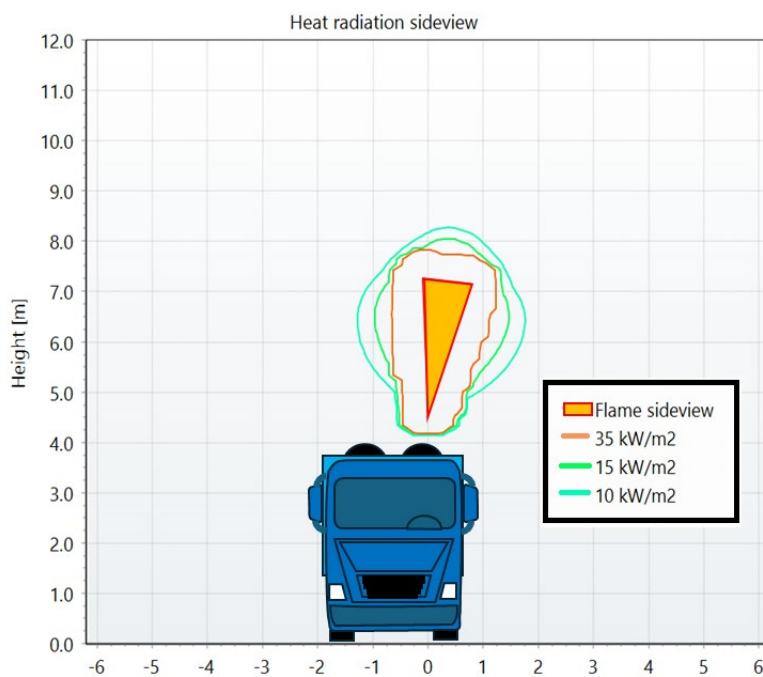
De volgende gegevens zijn gebruikt bij de berekeningen:

- > Waterstof (gas)druk: 350 bar
- > Cilinderinhoud: 322 liter
- > Aantal cilinders op truck: 2
- > Hoeveelheid waterstof in 2 cilinders: 15,96 kg
- > Druk bij openen TPRD: 350 bar
- > Doorsnede TPRD opening: 6 mm
- > Locatie TPRD: 4 m hoogte
- > Temperatuur: 9 °C
- > Pasquillklasse: D5
- > Gebouwen / appartementen op ca. 1 m.

Doordat de druk afneemt tijdens het leeglopen van de cilinders zal gedurende die tijd de fakkellengte afnemen en daarmee de reikwijdte van stralingsniveaus. In Figuur 5.10 en Figuur 5.11 zijn fakkellengtes en stralingsniveaus grafisch weergegeven op twee tijdstippen.

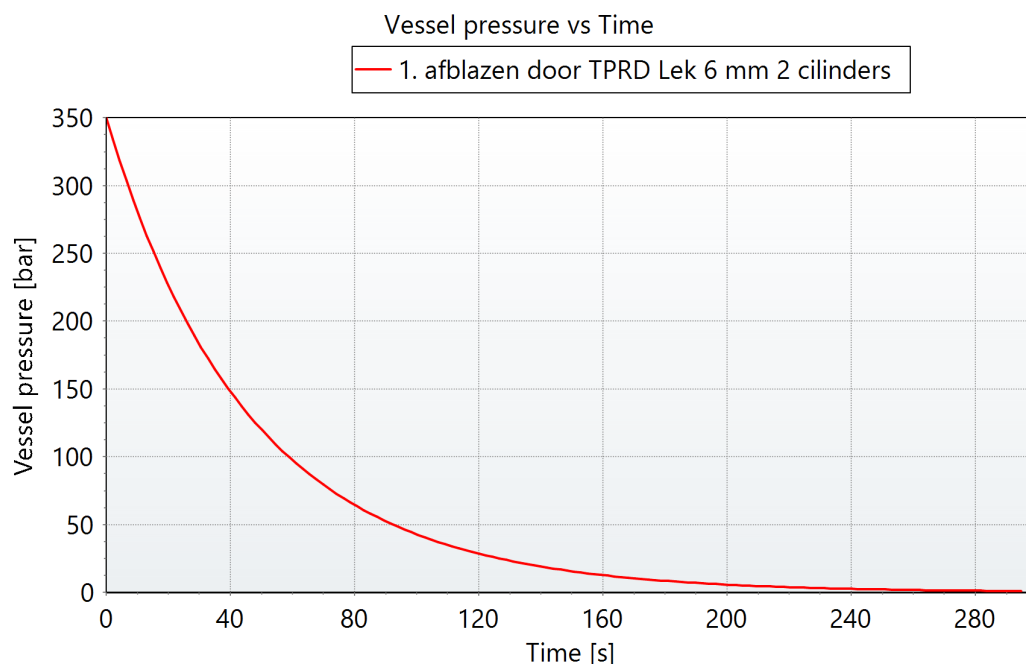


Figuur 5.10 Fakkels en stralingsniveaus op het moment dat de TPRD open gaat (t=0)



Figuur 5.11 Fakkels en stralingsniveaus na 1 minuut.

Het verloop van druk als functie van de tijd vanaf opening van de TPRD is weergegeven in Figuur 5.12. Na ca 5 minuten is alle waterstof ontsnapt en is er geen fakkels meer aanwezig.



Figuur 5.12 Afname van druk als gevolg van het leeglopen van de waterstofcilinders

In Tabel 5.3 is voor een aantal tijdstippen de fakkellengte weergegeven en is aangegeven op welke afstand (x) enkele veelgebruikte stralingsniveaus (zie ook eerste voorbeeldscenario) worden bereikt. Ook is aangegeven op welke hoogte (h) dit het geval is.

Tabel 5.3 Verloop druk, fakkellengte en stralingsniveaus bij leeglopen van cilinders

Tijdstip (min)	Druk (bar)	Fakkelhoogte (m)	35 kW/m ²		15 kW/m ²		10 kW/m ²	
			x (m)	h (m)	x (m)	h (m)	x (m)	h (m)
0	350	9,4	1,8	9,3	2,4	8,2	2,9	8,0
1	97,6	7,2	1,2	6,6	1,5	6,5	1,8	6,4
2	28,6	5,9	1,0	5,9	1,1	5,9	1,1	5,9
4	2,5	4,8	0,8	4,7	0,8	4,7	0,8	4,7

Uit de berekeningen en Figuur 5.10 en Figuur 5.11 blijkt dat op grondniveau geen schade zal worden aangericht en dat niemand letsel zal oplopen. Echter op grotere hoogte kan schade worden aangericht aan gebouwen (stralingsniveau vanaf zon 15 kW/m²), met branduitbreiding tot gevolg: op 8 m hoogte tot op ca. 2,5 m horizontaal gemeten vanaf het afblaaspunt.

6 Maatregelen voor brandveiligheid logistiek

Dit hoofdstuk bevat maatregelen om de brandveiligheidsrisico's te beheersen (vraag 3). Veiligheids- (risicobeheers)maatregelen kunnen preventief of mitigerend zijn. Preventief wil zeggen dat ze *kansbeperkend* zijn; ze beogen de kans op een incident te verkleinen. Mitigerende maatregelen zijn *effectbeperkend* en beogen de impact of ernst van de gevolgen van een incident te beperken. Maatregelen kunnen betrekking hebben op het ontwerp van het voertuig maar ook van ruimtelijke, bouwkundige, installatietechnische en organisatorische aard zijn. In dit hoofdstuk worden diverse risicobeheersmaatregelen behandeld.

Repressieve maatregelen (die (ook) effectbeperkend zijn), die gericht zijn op brand- of incidentbestrijding ten tijde van incident worden bij incidentmanagement in hoofdstuk 70 besproken. Ook nazorg na afloop wordt hoofdstuk 70 besproken.

In het vorige hoofdstuk zijn drie incidentscenario's beschreven, waarbij mogelijke ongewenste gebeurtenissen en gevolgen zijn uitgewerkt voor elektrische en waterstof-aangedreven zero-emissievoertuigen in de logistieke sector. In dit hoofdstuk worden de veiligheidsmaatregelen uitgewerkt voor deze voertuigen, ofwel maatregelen waarmee de brandrisico's kunnen worden beheerst en die op voorhand kunnen worden genomen. De maatregelen zijn (mede) gebaseerd op studies naar de brandrisico's van zero-emissiebussen (CROW, 2022 en CROW, 2023), maar hier toegespitst op de karakteristieken voor logistiek en de voorbeelden uit hoofdstuk 5. Bedenk hierbij dat voor inpandige laadvoorzieningen brandveiligheidseisen gelden zoals opgenomen in het Besluit Bouwwerken Leefomgeving (Bbl). Deze zijn met name gericht op het voorkomen van slachtoffers en het voorkomen van branduitbreiding naar een ander perceel. Maatregelen gericht op schadebeperking of bedrijfscontinuïteit zal de eigenaar of exploitant moeten regelen, bijvoorbeeld ten aanzien van de grootte van een (brand)compartiment (zie ook Reinders et al. 2024).

In Tabel 6.1 is een overzicht gegeven van de maatregelen, uitgesplitst per type maatregel. Met een kruisje (x) is aangegeven waarop ze van toepassing zijn. De tweede t/m de vierde kolom refereren naar de karakteristieken zoals deze naar voren kwamen in de voorbeeldscenario's in hoofdstuk 5. In de meest rechter kolom worden de maatregelen kort beschreven. Bijlage 1 bevat een meer uitgebreide beschrijving van de maatregelen. Hierin worden ook de informatiebronnen aangegeven.

Beheersing van (zero-emissiespecifieke) risico's op de openbare weg is (realistisch gesproken) alleen mogelijk via organisatorische en voertuig-gerelateerde maatregelen. Maatregelen bij depots vertonen grote overeenkomsten met de maatregelen voor busremises / -laadinstallaties zoals beschreven in (CROW, 2022a, 2022b, 2023). Met name aandacht voor brandoverslag door afstand te houden (als er ruimte is) of plaatsen van brandwerende voorzieningen is essentieel. Een overzicht van aan te houden afstanden voor

lithium-ion batterijen wordt gegeven in Tabel 6.2. Bij inpandig laden zullen deze afstanden vaak niet haalbaar zijn. Bovendien zal het dak hitteafvoer verhinderen en is bouwkundig gezien alleen via brandwerende voorzieningen branduitbreiding te voorkomen.

Waterstoffakkels uit de TPRD zullen in het algemeen naar boven zijn gericht, waardoor op “grondniveau” geen schade zal ontstaan. Op grotere hoogte kan wel brandoverslag optreden, met name indien de fakkel wordt afgebogen door de wind. Een TPRD met opening van 6 mm kan op 8 m hoogte tot op ca. 2,5 m (horizontaal gemeten vanaf het afblaaspunt) brandoverslag veroorzaken. Kleinere openingen van de TPRD(s) zullen deze afstand reduceren (maar dan duurt de fakkel langer). Indien waterstofcilinders in of nabij gebouwen of andere brandbare systemen worden gebruikt, dient met zich ervan te vergewissen dat een eventuele fakkel geen brand kan veroorzaken. Bij voorkeur informeert men bij de fabrikant of leverancier naar de veiligheidsafstanden. Mocht deze informatie niet beschikbaar zijn dan geeft Tabel 6.3 hiervan een indicatie. Deze tabel geeft de fakkellengtes en de afstand tot 15 kW/m² stralingsniveau in het verlengde van een verticale waterstoffakkel voor een aantal drukken en uitstroomopeningen. Deze ruimte dient te worden vrij gehouden boven de TPRD. Afbluigen van de fakkel door de wind is hierbij niet meegenomen.

Ten aanzien van preventie moet er aandacht zijn voor goed onderhoud, controle op en voorkoming van eventuele schade (en eventueel in quarantaine zetten van verdacht materieel), een goed (ontworpen en werkend) en up-to-date BMS en monitoring van het laadproces. Om een eventuele thermal runaway voor te zijn of in een vroegtijdig stadium te kunnen stoppen, of explosies / fakkels e.d. voor te zijn, kunnen hitte- en gasdetectors een rol spelen alsook automatische- (en/of batterij-interne) blussystemen. Ook maatregelen die gasophoping voorkomen zijn van belang. Voor grotere systemen zou de mogelijkheid tot snel en veilig demonteren van een batterijpakket een effectieve beheersmaatregel kunnen zijn. Mocht niettemin toch brand uitbreken, dan kunnen de gevolgen (met name binnen) worden beperkt via goede alarmering (brandmelders), sprinklers, duidelijke vluchtroutes, rookafvoer en goede bereikbaarheid voor de hulpdiensten. Verder is voor BEVs, een ruime en gedurende langere tijd beschikbare, hoeveelheid bluswater essentieel.

Uiteraard moet alle betrokken personeel en chauffeurs op de hoogte zijn van de risico's en de juiste wijze worden geïnstrueerd. Indien er bijzondere aspecten voor de omgeving verbonden zijn aan de risico's (geur- of wateroverlast, langdurige blokkering van wegen, e.d.) dient de omgeving op de hoogte te worden gesteld

Tabel 6.1 Overzicht maatregelen logistiek

Maatregel type	binnen / buiten bebouwde kom		binnen / buiten depot		Aandrijf-vorm		maatregel	Toelichting
	binnen	buiten	binnen	buiten	BEV	FCEV		
Voertuig ontwerp	x	x	x	x	x	x	Ontwerp volgens standaarden	> Houd rekening met: constructieveiligheid, alarmering, beperking van brandontwikkeling en -uitbreiding, brandbestrijding, toegankelijkheid voor brandweer, inrichting vluchtroutes. Gebruik systematiek PGS-37-1. > Voorzie het voertuig van een ABC-brandblusser op een gemakkelijk bereikbare locatie. > Maak duidelijk zichtbaar dat een vrachtwagen elektrisch/waterstof is aangedreven met bestickering. > Duid locaties van batterijen met symbolen.
	x	x		x	x		Maak snelle demontage batterijen mogelijk	> Dit zal door de voer- of werktuigbouwer moeten worden uitgevoerd en worden gedocumenteerd (en liefst duidelijk worden aangegeven op het materieel)
	x	x	x	x	x	x	Controle en onderhoud van voertuigen	> Regelmatige inspectie van laadpunt, kabels, connectoren, batterijen en laadinfrastructuur. > Controleer voertuigen visueel vóór aansluiten (schade, lekkages, geur). > Zorg voor goede afspraken in onderhoudscontracten.
	x	x	x	x	x		BMS en data uit software van laadinfra	> De vrachtwagens beschikken over systemen die oververhitting detecteren. > Bij afwijkingen wordt het laadproces gestopt en de chauffeur gewaarschuwd. Ook wanneer de chauffeur rust/slaapt. > Zorg dat software-updates via fabrikant/leverancier zo snel als mogelijk worden geïnstalleerd.
	x	x	x	x	x		Aanrijbscherming	> Voorkom schade aan batterijen bij laden/lossen door bescherming aan te brengen op plaatsen waar vrachtwagens parkeren rondom plaatsen waar batterijpakketten zich kunnen bevinden.

Maatregel type	binnen / buiten bebouwde kom		binnen / buiten depot		Aandrijf-vorm		maatregel		Toelichting
	binnen	buiten	binnen	buiten	BEV	FCEV			
	x	x	x	x	x		temperatuur en gassensoren	>	Zorg dat voertuigen uitgerust zijn met sensoren voor oververhitting of gasontwikkeling. > De chauffeur is bekend met de signalen die op een thermal runaway wijzen.
	x	x	x	x	x		Mogelijkheden voor directe toegang bluswater tot accupakket (via bijv. lansen)	>	Duid locaties waar UHD-systemen kunnen worden geplaatst.
	x	x	x	x	x		Mogelijkheid tot snelle elektrische isolatie van batterijpakket		
	x	x	x	x	x		Batterij-intern vroegtijdig detectiesysteem	>	Detectie van afwijkingen door BMS in accupakket voorkomt escalatie.
	x	x	x	x	x		Batterij-intern blussysteem		
			x			x	Geen holle ruimtes nabij waterstofinstallatie	>	Voorkom onbedoelde gasophoping bij waterstofvoertuigen.
					x	x	Voldoende afstand of brandwerend systeem tussen batterij en TPRD	>	Creëer afscherming zodat hitte van een brand de TPRD niet direct bereikt, zonder de veiligheidsfunctie te belemmeren.
bouwkundig			x		x	x	Constructie, bijv. bij laadplekken	>	Gebruik brandwerende materialen (klasse A1/A2), zorg voor wbdbo ≥ 60 min. > Houd rekening met een eventuele valschaduw van constructies rondom.
			x	x	x	x	afscherming van naast elkaar staande voertuigen tijdens laden of naar brandbare objecten	>	Overweeg plaatsing van brandwerende scheidingen tussen voertuigen, laadvoorzieningen en rondom quarantaineplaats. Hoogte en lengte gelijk aan de betrokken voertuigen. > Richt quarantaineplek in voor voertuigen met beschadigde batterijen of vermoeden van schade (impact, langdurig watercontact, BMS-alarmen).
			x	x	x	x	Aanrijbeveiliging	>	Bijvoorbeeld vangrails/varkensruggen rondom locaties van batterijpakketten en laadinfra.
			x	x	x	x	Overzichtelijke indeling	>	Zorg voor duidelijke belijning en pijlen. > Plaats laadinfrastructuur strategisch, op de meest rustige locaties.

Maatregel type	binnen / buiten bebouwde kom		binnen / buiten depot		Aandrijf-vorm		maatregel		Toelichting
	binnen	buiten	binnen	buiten	BEV	FCEV			
			x	x	x	x	Beperken van vluchttijd en borgen van vluchtcapaciteit	>	Zorg voor logische, gemarkeerde en vrij toegankelijke vluchtroutes, afgestemd op scenario's.
								>	Oefen evacuatieprocedures regelmatig, begeleid niet-zelfredzamen.
			x		x	x	Beperk ontwikkeling en verspreiding van rook / gassen	>	Zorg voor open overkappingen rondom laadplekken voor rookafvoer.
						x	Toepassing explosiewerend / bestendig glas in gevel en dak		
			x	x	x		bluswatervoorzieningen	>	Beschikking over zoveel als mogelijk bluswater. Minimaal 80 m ³ /uur voor een periode van vier uur in de vorm van een brandkraan, geboorde put of open water.
								>	Overweeg vloeistofkerende voorzieningen die (een deel van) het bluswater kunnen opvangen, zodat zoveel als mogelijk toxische stof wordt opgevangen.
ruimtelijk				x	x	x	voldoende afstand tot brandbare voorwerpen of aangrenzende voorwerpen	>	Voor BEVs: zie Tabel 6.2.
								>	Voor waterstof: zorg dat fakkel geen brandoverslag veroorzaakt: fabrikant /leverancier dient vereiste ruimte aan te geven; d.w.z. afstand tot 15 kW/m ² stralingsniveau; zie ook Tabel 6.3.
								>	Richt laadplekken bij voorkeur buiten en losstaand van bedrijfsgebouwen in, zodat rook en hitte minder impact hebben.
			x	x		x	Geen ontstekingsbronnen rond drukaflaatsystemen	>	Indien een waterstofgas vrijkomt uit een drukaflaatsysteem en niet direct ontsteekt kan er net buiten de opening een explosieve atmosfeer aanwezig zijn. Hierbinnen mogen geen ontstekingsbronnen aanwezig zijn (ATEX zone). De fabrikant / leverancier dient hierover informatie te verschaffen.
			x		x		brandwerende voorzieningen tussen voertuig en brandbare objecten		
			x	x	x	x	compartimenteer	>	Overweeg brandcompartimentering tussen plaatsen waar meerdere vrachtwagens dicht bij elkaar (in een straal van 15 meter) laden of geparkeerd staan

Maatregel type	binnen / buiten bebouwde kom		binnen / buiten depot		Aandrijf-vorm		maatregel	Toelichting
	binnen	buiten	binnen	buiten	BEV	FCEV		
installatie			x	x			zorg voor voldoende vluchtroutes	> Zorg voor logische, gemarkeerde en vrij toegankelijke vluchtroutes, afgestemd op scenario's.
				x			aanrijroute en bereikbaarheid hulpdiensten	> Locatie is vanuit twee richtingen bereikbaar. > Overkappingen zijn aan alle zeiden open met voldoende afstand om met een waterstraal de brandlocatie te kunnen bereiken. > Creëer opstelplaatsen voor brandweervoertuigen.
				x	x	x	duidelijke signalering	> Duidelijke bewegwijzering/belijning, sticker 'elektrisch voertuig', batterijlocatie gemarkeerd met symbool (zie Figuur 5.2).
			x	x		x	Vluchtroutes beschermen tegen impact van explosie (H2)	
			x	x	x	x	Ontwerp laadinfrastructuur	> Zorg dat laadinfrastructuur op een centraal, toegankelijk en goed bereikbaar punt kan worden uitgeschakeld. > Overweeg (via OEM) mobiele toegang tot monitoringssystemen van het batterij- en energiesysteem zodat actuele data (zoals temperatuur en laadstatus) beschikbaar is.
			x		x	x	Controle en onderhoud van bouwwerken/ installaties	> Onderhoud laadinfrastructuur, controleer brandmeldinstallatie en ventilatiesystemen.
			x		x	x	Brandmeldinstallatie (detectie)	> Gebruik camerabewaking, vlammenmelders of andere snelle detectiesystemen.
			x		x	x	Rook- en warmteafvoerinstallatie (RWA) in dak	
			x		x	x	Sprinklerinstallatie	> Overweeg sprinklers voor laadplekken.
			x		x	x	Ontruimingsalarminstallatie	> Zorg voor noodalarmering die personeel en bezoekers snel waarschuwt bij een incident.
			x		x		warmtebeeldcamera	> Gebruik voor toezicht en vroegtijdige detectie van batterijproblemen.
			x			x	Waterstofgasdetectie	> Zorg voor detectie bij voertuigen met waterstofinstallatie.
			x			x	Aansturing mechanische ventilatie door waterstofdetectie	> Koppel gasdetectie aan ventilatiesystemen.
			x	x	x	x	noodplan / rescue sheets	> De vrachtwagens beschikken over de bijbehorende rescue sheet en de chauffeur is op de hoogte van waar deze zich bevindt.

Maatregel type	binnen / buiten bebouwde kom		binnen / buiten depot		Aandrijfvorm		maatregel	Toelichting
	binnen	buiten	binnen	buiten	BEV	FCEV		
								> Indien geen rescue sheets bij het voertuig zijn geleverd, zijn er richtlijnen voor het opstellen hiervan²⁸. > Stel brandweerinformatiekaarten beschikbaar waarin laadplekken en laadinfrastructuur zijn opgenomen.
	x	x	x	x	x		Instabiele voertuigen in quarantaine	> Speciaal ingerichte plaats voor voertuigen met een verhoogde kans op een thermal runaway: - Impact op het batterijpakket - Langdurig contact met water - Signalen afgegeven door het BMS > Quarantaineplaats bevindt zich op 15 meter afstand van andere objecten en is voorzien van: - Warmtebeeldcamerasysteem gericht op locatie waar zero-emissievrachtwagens opladen, die bij het waarnemen van een abnormale temperatuur een waarschuwingssignaal uitzend. - Snelle toegang tot bluswater.
			x	x	x	x	Omgeving wijzen op bijzondere aspecten	> Voorlichting aan personeel en bezoekers over risico's en procedures bij incidenten. > Denk aan begeleiding van niet-zelfredzamen bij incidenten.
	x	x	x	x	x	x	Opleiding van chauffeurs en personeel	> Herkennen van gevaren van elektrische en/of waterstof voertuigen (paragraaf 3.3 & 2.4). > Weet welke meldingen die kunnen duiden op een oververhit batterijpakket het BMS kan weergeven. > Herkennen van signalen of oorzaken die wijzen op, of kunnen leiden tot een mogelijke thermal runaway (paragraaf 2.4 & 7.3.3). > Weet hoe te handelen en wie benaderd moeten worden bij een incident (paragraaf 7.3.1 & 7.4.1).

²⁸ <https://www.energysafety.info/info-for-manufactures>

Maatregel type	binnen / buiten bebouwde kom		binnen / buiten depot		Aandrijf- vorm		maatregel	Toelichting
	binnen	buiten	binnen	buiten	BEV	FCEV		
								> Kent de procedures voor het opladen van het batterijpakket van de bijbehorende vrachtwagen en de instructies van behorend bij de gebruikte laadinfrastructuur: - Aankoppelen en afkoppelen stekker. - Locatie noodstop. - Is op de hoogte van de kwetsbaarheid van laadstekkers en weet waar deze nadien opgeborgen dient te worden.
	x	x	x	x	x		Toezicht op laadproces	> Overweeg onderscheid in parkeer- en laadplekken tussen voertuigen op basis van type aandrijving (elektrisch, conventioneel) en batterijstatus. > Chauffeur/personeel monitort het laadproces zoveel als mogelijk. > Vermijd langdurig onbemand laden zoveel als mogelijk. > Voorzie voertuig/laadlocatie van detectiemiddelen die een thermal runaway kunnen waarnemen. - Warmtebeeldcamerasysteem gericht op locatie waar zero-emissievrachtwagens opladen, die bij het waarnemen van een abnormale temperatuur een waarschuwingssignaal uitzend. - Vrachtauto uitgerust met een BMS die een waarschuwingssignaal uitzend bij een oververhit batterijpakket, ook tijdens het laadproces. > Zorg dat de chauffeur alarmeringen waarneemt in de cabine tijdens de slaap- of rustperiodes. > Inspecteer laadinfrastructuur geregeld op beschadigingen en het gebruik van juiste kabels en stekkers. Stel hier protocollen voor op.
			x	x		x	Rookverbod en verbod op ontstekingsbronnen	
				x		x	plaats voertuig niet onder afdak	> Laadplekken bij voorkeur buiten en los van gebouwen.

Tabel 6.2 Afstanden tot waarop brandoverslag kan optreden bij brand in systemen met lithium-ion batterijen

Type	voer- / werktuig	afstand tot 15 kW/m ² straling op ca. 1,5 m hoogte (m)	referentie
Grote oplegger met brandbare lading		14	Dit document par. 5.3.1
EOS		10	PGS 37-1, 2023
Gemiddelde vrachtwagen met lading		9	Brans et al. 2024
Bus		6	Brans et al. 2024
Groot werktuig (wiellader)		5	Dit document par. 9.1
Klein werktuig / SUV		2,5	Brans et al. 2024 en dit document par. 9.2

Tabel 6.3 Indicatie voor lengte van (verticale) fakkels van waterstof en de afstand tot 15 kW/m² in het verlengde van de fakkel voor een aantal drukken en uitstroomopeningen

Druk (bar)	parameter	Diameter uitstroomopening TPRD (mm)						
		0.5	1	2	4	6	10	20
200	hoogte fakkel (m)	0.9	1.7	3.2	6	9	14	26
	hoogte tot 15 kW/m ² (m)	1.5	2.5	4.1	8	11	17	32
300	hoogte fakkel (m)	1.0	1.9	3.6	7	9	15	28
	hoogte tot 15 kW/m ² (m)	1.7	2.6	4.8	9	13	21	38
400	hoogte fakkel (m)	1.2	2.3	4.4	8	12	19	34
	hoogte tot 15 kW/m ² (m)	1.8	3.0	5.5	10	15	23	42
700	hoogte fakkel (m)	1.5	2.9	5.4	10	15	23	43
	hoogte tot 15 kW/m ² (m)	2.0	3.9	6.8	13	18	29	53
900	hoogte fakkel (m)	1.7	3.2	6.0	11	16	25	47
	hoogte tot 15 kW/m ² (m)	2.4	4.0	7.5	14	20	31	58

7 Incidentmanagement logistiek

In dit hoofdstuk worden de vragen 4 t/m 6 beantwoord voor logistiek0, waarbij een handelingsperspectief voor incidentmanagement (incidentbestrijding en berging) wordt opgesteld en wordt ingegaan op (langdurig) veilig stellen van materieel (nazorg). Hiervoor is gebruik gemaakt van eerder opgestelde kaders, die hieronder zijn beschreven, en expertise van onderzoekers.

Eerst wordt de gebruikte informatie gepresenteerd. Vervolgens wordt een handelingsperspectief voor elektrisch aangedreven logistieke voertuigen gepresenteerd, gevolgd door een handelingsperspectief voor waterstof aangedreven voertuigen.

7.1 Gebruikte informatie

In de afgelopen jaren zijn door de brandweer diverse handelingsperspectieven ontwikkeld voor de incidentbestrijding van batterij-elektrische voertuigen en incidenten met waterstof. Deze reeds bestaande aandachtsskaarten vormden het uitgangspunt voor de beschrijving van incidentmanagement in dit hoofdstuk. De gebruikte kaarten zijn:

Lithium-ion batterijen

- > *Aandachtskaart bestrijding incident e-voertuig (hybride of elektrisch voertuig)* (Brandweeracademie, 2020).
Deze aandachtsskaart geeft een handelingsperspectief voor het optreden bij incidenten met hybride of elektrische voertuigen.
- > *Aandachtskaart Lithium-ion energiedragers* (Brandweer Nederland, 2021).
Deze aandachtsskaart geeft een handelingsperspectief voor het optreden bij incidenten met lithium-ion batterijen.
- > *Naslagwerk (H)OvD en AGS aandachtsskaart elektrisch aangedreven voertuigen* (Brandweer Nederland, 2023).
Aandachtskaart voor optreden (hoofd)officieren van dienst en adviseur gevaarlijke stoffen bij incidenten met elektrisch aangedreven voertuigen.

Waterstof

- > *Aandachtskaart waterstof (drukhouder, gasvormig)* (Brandweer Nederland, 2019c)
Deze aandachtsskaart geeft een handelingsperspectief voor het optreden bij incidenten met waterstofdrukhouders.
- > *Aandachtskaart Bestrijding incidenten voertuigbrand met H2* (Brandweer Nederland, 2019b)
Deze aandachtsskaart geeft een handelingsperspectief voor het optreden bij incidenten met een waterstofvoertuig.
- > *Aandachtskaart Bestrijding incidenten H2 brandstoftanks* (Brandweer Nederland, 2019a)

Deze aandachtskaart geeft een handelingsperspectief voor het optreden bij incidenten met waterstofbrandstoftanks.

Bij het opstellen van dit hoofdstuk is tevens gebruikgemaakt van aanvullende documentatie van voertuigspecifieke rescue sheets en technische informatie, zoals genoemd in hoofdstuk 4.

7.2 Opzet handelingsperspectief

Net als in de praktijk wordt onderscheid gemaakt tussen incidentbestrijding en nazorg, waarbij de laatste betrekking heeft op de fase na het bestrijden van een incident, zoals de berging.

Incidentbestrijding is uitgewerkt aan de hand van vijf fasen:

- > Alarmeren en uitruk: de fase van de start van een incident, van alarmering tot aan aankomst van de brandweer.
- > Herkennen: de fase van aankomst van de brandweer waarin het voertuig moet worden herkend als een zero-emissievoertuig.
- > Verkennen: de verkenningsfase van het incident, waarbij de mogelijkheden van en voorwaarden voor brandweerinzet worden bekeken.
- > Stabiliseren: de fase waarin de handelingen worden verricht om het incident te stabiliseren en escalatie te voorkomen.
- > Bestrijden: het incident wordt bestreden, bijvoorbeeld door het blussen van een brand.

Nazorg omvat de afwikkeling van het incident, waaronder:

- > Veilige berging
- > Zoveel mogelijk beperken van overlast (vrij maken van weg bijvoorbeeld)
- > Langdurig veilig stellen van verbrande voertuigen.

Indien de volgorde waarin handelingen worden uitgevoerd van belang is, zijn de opsommingstekens (>) vervangen door nummers.

7.3 Elektrisch aangedreven logistieke voertuigen

In deze paragraaf wordt ingegaan op een incident bij elektrisch aangedreven, logistieke voertuigen. Daarbij valt te denken aan een elektrische vrachtwagen (categorie N2 / N3). De onderstaande acties zijn daarbij ook van toepassing op categorie N1, maar daar kan ook gekozen worden dezelfde acties te hanteren als bij een personenvoertuig.

Aangenomen wordt dat vier verschillende personen/partijen een rol hebben in het incidentmanagement:

- > Chauffeur: de persoon of personen die het incident waarnemen.
- > Bedrijfsdeskundige vanuit transportbedrijf: persoon met documentatie en kennis van de vrachtwagen.
- > Brandweer: incidentbestrijding.
- > Bergers: verplaatsen de vrachtwagen na het incident naar een veilige locatie.

Er zijn twee soorten incidenttypes mogelijk:

1. Ongeval
2. Brand

Waar nodig zal het onderscheid tussen beide incidenttypes worden gemaakt.

In de fases herkennen, verkennen, stabiliseren en bestrijden heeft alleen de brandweer een rol.

7.3.1 Alarmeren

Chauffeur

Algemene handelingen

- > Voer bij het waarnemen van een (mogelijk) incident de handelingen uit volgens de rescue sheet. Dit kan per merk en model vrachtwagen verschillen. Uit de bestudeerde rescue sheets blijkt dat dit vaak bestaat uit bijvoorbeeld het verdraaien en uitnemen van de sleutel en het aantrekken van de parkeerrem.²⁹
- > Indien een signaal/melding is waargenomen die duidt op een incident met de batterij, meldt dit aan de brandweer/bedrijfsdeskundige.
- > Stel het veiligheidsprotocol van het bedrijf in werking.

Scenario: Indien het systeem van de vrachtwagen een melding/signaal afgeeft dat duidt op batterijproblemen:

1. Stop de vrachtwagen direct op een veilige plaats, of, in geval dat deze geparkeerd staat nabij een object, verplaats deze zo snel mogelijk naar een veilige plaats. Vermijd indien veilig en mogelijk om te parkeren in tunnels, dichtbij andere voertuigen/gebouwen of andere kwetsbare objecten.
2. Schakel de vrachtwagen uit.
3. Indien de vrachtwagen aan het laden is, koppel de laadstekker los volgens de aanwijzingen op de rescue sheet.³³
4. Neem afstand en waarschuw iedereen die in de buurt van de vrachtwagen is. Zorg er, indien mogelijk, voor dat er niemand in de buurt van de vrachtwagen komt.
5. Stel de brandweer op de hoogte. Vertel dat de vrachtwagen een melding/signaal van oververhitte batterijen heeft afgegeven.
6. Stel de bedrijfsdeskundige op de hoogte.

Scenario: Bij het waarnemen van een thermal runaway in de batterijen of een beschadiging aan de batterijen ten gevolge van een ongeval

1. Evacueer de truck onmiddellijk en ga snel bij de truck vandaan.
2. Waarschuw iedereen die in de buurt is en stel het gebied rondom de truck veilig.
3. Neem afstand en waarschuw iedereen die in de buurt van de vrachtwagen is. Zorg er, indien mogelijk, voor dat er niemand in de buurt van de vrachtwagen komt.
4. Stel de brandweer op de hoogte.
5. Stel de bedrijfsdeskundige op de hoogte.

Bedrijfsdeskundige vanuit het transportbedrijf

- > Lever bij de vrachtwagen behorende rescue sheets aan bij de brandweer.
- > Breng zoveel als mogelijk kennis in over de vrachtwagen.

²⁹ Alleen indien de situatie veilig wordt geacht.

Bedrijfsdeskundige van de locatie

1. Schakel de laadvoorziening van het gehele terrein uit.
 2. Zorg ervoor dat naastgelegen vrachtwagens verplaatst worden naar een veilige locatie³⁰.
- > Breng de brandweer op de hoogte van bijzonderheden op de locatie.
 - Valschaduw nabijgelegen gebouw.
 - Geacreëerde quarantainelocaties voertuigen

Brandweer:

- > Rijd bovenwinds aan.
- > Verkrijg, indien mogelijk, informatie over het voertuig (via het rescue informatie systeem) en de situatie van het incident

7.3.2 Herkennen

- > Elektrische vrachtwagens zijn mogelijk te herkennen aan bestickering, zoals in Figuur 7.1 of, indien gelabeld volgens ISO17840-4, zoals in Figuur 7.3.
- > Een elektrische vrachtauto heeft geen uitlaat.
- > Hoogvoltage (max 800V) battery packs en -kabels. Er kan spanning op de battery pack en het voertuig staan en er kan een vlamboog ontstaan. Kans op elektrocutie / elektrische schok is met gebruik van PBM uitgesloten. Locaties met hoge spanning worden mogelijk aangeduid met stickers, zoals in Figuur 7.2.
- > Hoog voltage kabels zijn te herkennen aan de oranje kleur.
- > Er is kans op blijvende stroomtoevoer als het voertuig aan een laadpaal staat.



Figuur 7.1 Mogelijke bestickering elektrische vrachtwagen.



Figuur 7.2 Hoogspanningsticker.



Figuur 7.3 Links: volledig elektrisch, midden: elektrisch + benzine, rechts: elektrisch + diesel.

³⁰ Alleen indien de situatie veilig wordt geacht.

7.3.3 Verkennen

- > Persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM) en hulpmiddelen bij verkenning (en bestrijding):
 - geheel gesloten, droge uitrukkleding
 - bij rook: onafhankelijke adembescherming
 - vluchtmasker voor een eventueel slachtoffer in de machine bij ontgassende battery pack (als dat niet mogelijk is voertuig ventileren)
 - warmtebeeldcamera (WBC)
 - droog isolerend gereedschap.
- > Let op! Voer bij elk stap een Laatste Minuut Risico Analyse (LMRA) uit, omdat de gevaren divers zijn en niet altijd zichtbaar of herkenbaar.
- > Benader het voertuig onder een hoek van 45 graden: zo sta je veilig bij spontaan rollen van het voertuig of wegschietende delen van het voertuig
- > Achterhaal via de Rescue sheet informatie over energiebron/brandstof, voertuigconstructie, veiligheidsvoorzieningen en de-activatie van het aandrijfsysteem.
- > Raadpleeg bij twijfel over de (toxiciteit van de) situatie zo spoedig mogelijk de AGS. Deze kan tevens informatie ophalen of geven over de toxiciteit van stoffen die vrijkomen uit het batterijpakket .

Ongeval

- > Duid de betrokkenheid van de batterij. Kijk of er rook uit het batterijcompartiment komt, tezamen met warmteontwikkeling.
- > Verken op beschadigingen aan hoog voltage (oranje) kabels en het beschadigingen/vervormingen van het batterijpakket. Een instabiele batterij vormt CO (te meten met een CO-meter).
- > Houd bij ernstige beschadiging van het batterijpakket één straal lage druk gereed voor het geval de batterij in thermal runaway raakt. Monitor de temperatuur van de batterij met een WBC.
- > Let op rookverschijnselen en sissende geluiden die duiden op een thermal runaway (mogelijk vanaf circa 60 °C). Gebruik de 4-gasmeter om brandbare en toxische gassen te meten.
- > Verken op lekkage van vloeistoffen zoals elektrolyt uit het batterijpakket.
- > Alle voorzorgsmaatregelen bij het optreden bij reguliere voertuigen gelden ook voor vrachtwagens (airbaghoezen, scherpe voorwerpen afschermen voor het slachtoffer, etc.).

Brand

- > Vermijd contact met de rook als het niet noodzakelijk is voor de werkzaamheden. Blijf uit (zichtbare) gaswolken.
- > Probeer te achterhalen waar de rook vandaan komt en duid daarmee de betrokkenheid van de batterij³¹. Kijk of er rook uit het batterijcompartiment komt, tezamen met warmteontwikkeling, gebruik eventueel een warmtebeeldcamera. Vraag de bedrijfsdeskundige of de vrachtwagen beschikt over een op afstand uit te lezen systeem.
- > Bij rook, maar geen warmteontwikkeling, is er niet per definitie een thermal runaway. Neemt de lithium-ion battery pack geen deel aan de brand, bestrijd de brand dan op

³¹ Een thermal runaway is mogelijk te herkennen aan grijs/witte rook met typische chemie/elektriciteitsgeur met in aanvang weinig pluimstijging.

de gewone manier. Blijf wel met een WBC de temperatuur van de battery pack monitoren met het oog op het ontstaan van een thermal runaway.

7.3.4 Stabiliseren en bestrijden

- > Ontruim zo nodig de omgeving.
- > Indien de onderstaande handelingen niet op een veilige manier verricht konden worden door de waarnemer(s), kunnen deze handelingen, of een aantal van deze handelingen wel worden verricht door de brandweer met de juiste PBM's:
 1. Deactiveer de vrachtwagen zoals aangegeven in de rescue sheet. Dit kan per merk en model vrachtwagen verschillen.
 2. Eventuele andere handelingen volgens de Rescue sheet die van belang zijn bij een incident.
- > Blokkeer de wielen zodat de vrachtwagen niet kan gaan rollen

Ongeval

- > Dek bij ernstige deformatie van de vrachtwagen uit voorzorg delen van de carrosserie waarmee het slachtoffer contact kan maken af met een rubberen mat of deken.
- > Voorzie slachtoffers in de vrachtwagen – in geval van een rokende/sissende batterij– van adembescherming om inademing van waterstoffluoride (HF) zo veel mogelijk te vermijden. Als dat niet mogelijk is, zorg dan voor frisse lucht voor het slachtoffer door het voertuig te ventileren (ramen openen/forceren).
- > Draag bij ernstige deformatie van de vrachtwagen uit voorzorg tegen (gering) elektrocutiegevaar droge, geheel gesloten uitrukkleding, onafhankelijke adembescherming, 1000V-handschoenen met de schacht over de mouw van de uitrukkleding, gebruik droog isolerend gereedschap. Het is niet mogelijk te meten of er spanning op het voertuig staat.

Brand

- > Benader het voertuig van voren onder een hoek van 45 graden met 2 stralen lage druk en benut de volledige worplengte van de straal.
- > Koeling van het batterijpakket is het effectiefst indien op celniveau kan worden gekoeld (NIPV, 2023a). Er is op dit moment nog geen methode voor handen om de thermal runaway effectief te bestrijden in elektrisch aangedreven zware logistieke voertuigen. Het NIPV heeft succesvolle experimenten uitgevoerd met de bestrijding van batterijbranden van elektrische personenauto's met ultrahogedruk snij- en blussystemen (Hessels & Brans, 2024). Er worden voorbereidingen getroffen om de mogelijkheden voor bestrijding van branden van zwaarder elektrisch materieel zoals vrachtwagens te testen.
- > Overweeg om de vrachtwagen gecontroleerd uit te laden branden indien de omgeving (en andere lokale omstandigheden) zich daartoe lenen.
- > Brandbestrijding benodigt grote hoeveelheden water. Er moet worden gestreefd naar het beheersen en opvangen van het wegstromende bluswater vanwege de impact van het vervuilde bluswater op het milieu.

7.3.5 Nazorg

Brandweer

- > Draag een voertuig met een lithium-ion batterijpakket over aan een in elektrische voertuigen gespecialiseerde berger (bekend bij wegbeheerder en de Vereniging van Bergings- en Mobiliteitsspecialisten (VBM)). Na overdracht blijven continu temperatuurmonitoring en zo nodig koeling van belang. Het overdrachtsmoment staat niet vast, maar dient per incident te worden bepaald. Ondersteun de berger door het monitoren van het batterijpakket indien er kans is op herontsteking. Een incident met een elektrisch aangedreven vrachtwagen kan daarmee langer duren dan een incident met een conventioneel aangedreven vrachtwagen.
- > Informeer het waterschap en/of de omgevingsdienst over eventueel verontreinigd koel of bluswater en verontreinigde binnenruimtes.
- > Procedure schoon werken opstarten.

Bedrijfsdeskundige

- > Lever de berger de bij de vrachtwagen behorende Rescue sheet en lever zoveel als mogelijk informatie die mogelijk relevant is aan.

Bergingsbedrijf

- > Volg de instructies uit de rescue sheet op. Sommige vrachtwagens hebben eisen omtrent de snelheid, afstand en de liftpunten waarmee het voertuig versleept mag worden.
- > Gebruik geen andere verankeringspunten dan de in de rescue sheet aangegeven bevestigingspunten. Deze punten kunnen verschillen per vrachtwagen.
- > Parkeer een elektrische vrachtwagen die bij een ongeval betrokken is geweest of waarvan de batterij gebrand heeft op een geschikte plaats op een veilige afstand (min. 10 meter) van andere voertuigen, gebouwen en brandbare voorwerpen.
- > Maak gebruik van externe expertise (bijvoorbeeld machinefabrikant of leverancier) voor eventuele demontage van het batterijpakket.

Afvoeren van de vrachtauto in een container gevuld met water is i.h.a. niet mogelijk. Om te voorkomen dat de incidentlocatie gedurende vele uren of zelfs dagen bezet of geblokkeerd zal blijven kan een voertuig als geheel worden afgesleept of het batterijpakket kan worden gedemonteerd waarna gedemonteerde onderdelen in een dompelcontainer kunnen worden afgevoerd. Hierbij willen we onderstaande punten onder de aandacht brengen.³²

Afslepen van het voertuig:

- > Probeer (bijvoorbeeld door politiebegeleiding) tijdens wegslepen het overige verkeer op veilige afstand te houden, waarbij we adviseren minimaal 10 meter aan te houden tot het af te slepen voertuig. Ook wordt bij voorkeur een route vrij van bebouwing binnen deze afstand gekozen.
- > Het verdient aanbeveling om de temperatuur van het batterijpakket te monitoren, of rondom het batterijpakket enige afscherming aan te brengen tegen steekvlammen en wegschietende onderdelen (bijv. brandwerende platen of bekleding).
- > Indien mogelijk ook begeleiding door brandweer zodat blussen mogelijk is bij (opnieuw) opblaaien van thermal runaway.

³² NIPV is voornemens een studie uit te voeren naar de mogelijkheden om dit veilig te kunnen doen.

Demonten van het batterijpakket:

- > Het batterijpakket wordt gedemonteerd en in een dompelbak afgevoerd (zie ook paragraaf 4.5.2).
 - De demontage mag alleen worden uitgevoerd door een deskundige, met kennis over de bevestiging en opbouw van de batterij, bijvoorbeeld een technicus vanuit de onderneming, of de voertuig(om)bouwer, en op voorwaarde dat deze dit verantwoord acht
 - Vergewis je ervan dat opnieuw ontbranden van de batterij niet optreedt tijdens demontage door continu door middel van een warmtebeeldcamera de temperatuur te monitoren. Bij oplopen van temperatuur afstand nemen en blussen (dus water dient voorradig te zijn)
 - Tijdens het verwijderen en demonteren wordt een straal lagedruk klaargelegd, zodat het batterijpakket en/of de module(s) direct gekoeld kan / kunnen worden indien de temperatuur onverhoopt oploopt
 - De persoon/personen die de batterij verwijderen en demonteren gebruikt/gebruikt PBM's, waaronder
 - 1000 Volt-handschoenen
 - Ademlucht
 - Bescherming tegen (steek)vlammen en gelanceerde batterijonderdelen
 - Zorg voor vrije ruimte / (snelle) vluchtroute voor persoon / personen die demontage uitvoert / uitvoeren.
- > Al met al verdient het aanbeveling dat de voertuig(om)bouwer er bij de inbouw van de batterijpakketten rekening mee houdt dat deze op een eenvoudige / veilige manier kunnen worden gedemonteerd. Instructies hiervoor dienen duidelijk in het voertuig of op de batterijpakketten aanwezig te zijn.

7.4 Waterstof aangedreven vrachtwagen

Hieronder wordt een handelingsperspectief gepresenteerd aan de hand van het scenario met de waterstofvuilniswagen, in dit geval generieker in de vorm van een waterstof aangedreven vrachtwagen. Deze paragraaf hanteert eenzelfde indeling als hoofdstuk 7.3. Indien de volgorde waarin handelingen worden uitgevoerd van belang is, zijn de opsommingstekens (>) vervangen door nummers.

In de fases herkennen, verkennen, stabiliseren en bestrijden heeft alleen de brandweer een rol.

7.4.1 Alarmeren

Chauffeur

1. Stel het veiligheidsprotocol van het bedrijf in werking.
2. Neem (minimaal) 25 meter afstand bovenwinds.
3. Stuur een bedrijfsdeskundige ter plaatse.

Indien veilig en mogelijk:

- > Parkeer bij het waarnemen van een incident, indien dit veilig kan, de truck op een zo afgelegen mogelijke plaats.
- > In het geval van een kleine brand, probeer deze te blussen. Houd er rekening mee dat TPRD's niet gekoeld mogen worden.

Bedrijfsdeskundige:

- > Lever de bij de voertuig behorende rescue informatie sheet.

Brandweer:

- > Rijd bovenwinds aan.
- > Verkrijg, indien mogelijk, informatie over het voertuig (via het rescue informatie systeem) en de situatie van het incident.

7.4.2 Herkennen

- > Het symbool in Figuur 7.4 kan op de voor-, achter- en/of zijkant van de vrachtwagen staan. Dit ISO 17840 - symbool geeft aan dat de vrachtwagen waterstof-elektrisch is aangedreven en waarschuwt voor de aanwezigheid van waterstof. Een toelichting van de overige symbolen wordt gegeven in Figuur 7.5.



Figuur 7.4 Symbool waterstof-elektrische voertuigen



Figuur 7.5 Toelichting symbolen

- > Met de ophoping van waterstof in de vrachtwagencabine hoeft geen rekening gehouden te worden. Dit is namelijk niet mogelijk, omdat alle onderdelen die waterstof bevatten zich buiten de cabine bevinden.
- > Gebruik een warmtebeeldcamera om een waterstofvlam te detecteren.
- > Waterstoftanks hebben een terugslagbeveiliging. Wanneer een tank loskomt van een vrachtwagen zal er geen grote uitstroom van waterstof zijn.

7.4.3 Verkennen

- > Een AGS kan de aanwezige eenheden van nadere informatie voorzien over waterstof.
- > Draag gehoorbescherming: de brandstoftanks bevatten TPRD's die bij een temperatuur van 110 graden Celsius openen. Dit duurt gemiddeld 6 tot 12 minuten. Het is mogelijk dat dit na aankomst van de eerste brandweereenheid plaatsvindt.

Hierbij kan een fakkel ontstaan. Het afblazen duurt tientallen seconden en geeft een hoog en hard geluid (140 dB).

- > Achterhaal of de waterstoftanks al hebben afgeblazen. Raadpleeg hiervoor bijvoorbeeld omstanders. Iedere waterstoftank blaast afzonderlijk af.
- > Raadpleeg het rescue systeem voor de locaties van:
 - Waterstoftanks
 - TPRD's
 - Lithium-ion batterijen. Zie voor meer info hoofdstuk 2.1.
- > De afblaasrichting is altijd loodrecht ten opzichte van het dak. Bij een ongeval kan door beschadiging van het afblaassysteem de afblaasrichting anders zijn.
- > Houd rekening met de aanwezigheid van hoogvoltage elektriciteit, voornamelijk in het motorcompartiment.
- > Gebruik voor het detecteren van waterstof een CO-meter. Explosiegevaarmeters geven een indicatie van het explosiegevaar.

7.4.4 Stabiliseren

- > Blus een waterstoffakkel nooit! Door de hoge druk gaat een fakkel niet uit.

7.4.5 Bestrijden

Ongeval

1. Stel de omgeving veilig.
2. Gebruik de CO-meter om eventuele waterstoflekage(s) waar te nemen.
3. Gebruik de explosiemeter om explosiegevaar waar te nemen. Trek terug wanneer deze afgaat!

Brand:

1. Houd zoveel mogelijk afstand en benader de vrachtwagen onder dekking van een straal als bescherming tegen een onverwachte steekvlam of snelle branduitbreiding. Houd rekening met het ontstaan van een fakkelbrand.
2. Scherm de vuilniswagen af met een waterstraal bij een externe brand.
3. Voorkom dat de TPRD's gekoeld worden; dit kan de werking belemmeren. Koel waterstoftanks alleen wanneer zeker is dat de TPRD's niet geraakt worden. Bij twijfel: niet koelen!
4. Blus de vrachtwagen met stralen lage druk. Maak gebruik van de worplengte van de straal.

7.4.6 Nazorg

Eigenaar vrachtwagen:

- > Stem met het bergingsbedrijf af over veilige afhandeling van het incident. Deel daarbij systeemkennis van de vrachtwagen met de berger om samen acties te bedenken om weer veilig en effectief terug te keren naar een veilige situatie.
- > Zorg, samen met het bergingsbedrijf³³ voor het veilig verwijderen van het resterende waterstofgas uit de tanks.

Brandweer:

³³ Eventueel kan de leverancier van de vrachtwagen waardevolle informatie geven over het veilig verwijderen van het waterstofgas.

- > Draag het incident over aan het bedrijf indien het gevaar geweken is en er voor de brandweer geen werkzaamheden meer zijn.
- > Waterstoftanks zijn nooit helemaal leeg, ook niet na het afblazen. Er blijft altijd 8 tot 10 bar waterstofgas aanwezig.
- > Zorg voor een goede overdracht aan het bergingsbedrijf.

Bergingsbedrijf:

- > Waterstoftanks zijn nooit helemaal leeg, ook niet na het afblazen. Er blijft altijd 8 tot 10 bar waterstofgas aanwezig. Houd hier rekening mee. Zorg voor het veilig verwijderen van het resterende waterstofgas uit de tanks.
- > Het sleepprotocol kan wisselen per vrachtwagen. Gebruik hiervoor het rescue informatie systeem of door de producent ter beschikking gestelde rescue sheets over de juiste wijze van afslepen.

Deel III - Bouw

8 Systeembeschrijving emissieloos bouwen op de bouwplaats

Het woord 'bouwplaats' verwijst naar elke tijdelijke of mobiele arbeidsplaats waar civieltechnische werken of bouwwerken worden gerealiseerd (Arbo Inspectie, 2008). Dit omvat activiteiten zoals wegebouw, grondwerken, renovatie, reparatie, sloop en onderhoud. Momenteel vindt er een transitie plaats van bouwplaatsen in Nederland naar klimaatneutraal. Om samen met marktpartijen te werken aan bouwplaatsen en -transport heeft het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat samen met diverse stakeholders vier verschillende transitiepaden opgesteld om klimaat neutrale en circulaire infrastructuurprojecten te realiseren (Rijksoverheid, 2023; SEB, 2024; VNG, z.d.):

- > Weg, Dijk, Spoor
- > Woningbouw en Utiliteitsbouw
- > Kustlijnzorg en vaargeulonderhoud
- > Energie

Een gevolg van de overgang naar klimaatneutrale bouwplaatsen is dat dieselaangedreven bouwmachines worden vervangen door zero-emissie varianten. De aanwezige hoeveelheid zero-emissiebouwmachines hangt af van de grootte en het doel van de bouwplaats.

8.1 Energievoorziening bouwplaatsen

De inzet van zero-emissiebouwmaterieel heeft impact op de energievoorziening op de bouwplaats. De Nationale Agenda Laadinfrastructuur, werkgroep Laadinfrastructuur, heeft een routekaart voor de realisatie van de benodigde laadinfrastructuur opgesteld voor de bouw³⁴.

In de praktijk blijkt dat de inzet van elektrische bouwmachines regelmatig wordt belemmerd door netcongestie en het ontbreken van een tijdige of voldoende aansluiting op het elektriciteitsnet.

Een mogelijke oplossing voor het voldoen aan de energiebehoefte op bouwplaatsen met beperkte netcapaciteit is het gebruik van waterstof-brandstofcelaggregaten als alternatieve energievoorziening. (Bouwen op waterstof, z.d.; Spoelstra & van de Ven, 2025).

Er zijn verschillende opties voor energievoorzieningen op bouwplaatsen (CE Delft, 2023):

- > Wisselbatterij, deze worden opgeladen op externe locaties.
- > Een netaansluiting
- > Energieopslagsystemen

³⁴ www.agendalaadinfrastructuur.nl/werkgroepen/laadinfrastructuur+voor+de+bouw

Energieopslagsystemen vormen een belangrijk nieuw element op bouwplaatsen. Er is onderscheid te maken tussen energieopslagsystemen op basis van:

- > Vermogen, varieert ten tijde van het schrijven van dit rapport tussen 50-4500 kW
- > Energiedrager
 - o Alleen batterijen
 - o Energieopwekking met een waterstofbrandstofcel, gecombineerd met energieopslag in een batterij.
- > Variant met laadpaal(en)

Er zijn drie laadmogelijkheden voor zero-emissiebouwmachines (Kloosterman & Jansen, 2024):

1. Vaste accu. De machine wordt direct aangesloten op een laadvoorziening. Dit kan een mobiel batterijpakket zijn op de bouwplaats of een vast laadstation (met netaansluiting) op of nabij de bouwplaats.
2. Verwisselbare accu's. De accu's worden getransporteerd van en naar een vast laadstation en op de bouwplaats verwisseld.
3. Directe aansluiting van de machine op het stroomnet. Hierbij kan een energieopslagsysteem worden ingezet om pieken in de vermogensvraag op te vangen.

Het moment en de manier waarop bouwmachines worden opgeladen, hangen af van een aantal factoren:

- > Sommige bouwmachines worden ingezet voor een proces dat niet gepauzeerd kan worden, zoals asfalteren. In dat geval is het niet mogelijk om een pauze in te lassen waarin de machine kan worden opgeladen.
- > Niet van alle apparatuur kunnen de batterijpakketten worden verwisseld, waardoor de machine naar een laadlocatie moet worden verplaatst.
- > Op sommige bouwplaatsen wordt slechts tijdens bepaalde dagdelen gewerkt. Dit geeft de gelegenheid om machines tijdens de overige dagdelen op te laden. De machine wordt ook in dit geval naar een laadlocatie verplaatst.

Het, door zijn aard, tijdelijke en flexibele karakter van bouwplaatsen leidt er, volgens de begeleidingscommissie, ook toe dat soms "creatieve" oplossingen worden gezocht. Hierdoor ontbreekt bijvoorbeeld aanrijdbescherming wel eens bij de gebruikte mobiele DC-laders. Bij gebruik van bestaande publieke laadpalen voor elektrische personenauto's (bijvoorbeeld voor een kleine graafmachine bij kleinere binnenstedelijke werken) komt het voor dat men een adapter toepast die het IEC 61851 mode 3 protocol simuleert, waarbij een ongecontroleerde aansluiting van diverse typen apparatuur mogelijk is, tot en met een 'bouwpaddestoel' toe. Dit kan tot veiligheidsrisico's leiden, zoals bijvoorbeeld vlambogen als men stekkers lostrekt zonder eerst de lader af te schakelen.

8.2 Zero-emissiebouwmaterieel

Momenteel is er een aantal bouwmachines dat is omgebouwd van diesel aangedreven naar batterij-elektrisch. Naar verwachting gaat dit aantal afnemen en zullen deze machines worden vervangen door machines die vanuit de fabriek hiervoor zijn ontworpen. Grote OEM's zoals Volvo, Caterpillar en Komatsu en Hitachi hebben de markt reeds betreden.

Natuur en Milieu heeft de reeds beschikbare zero-emissiebouwmachines onderverdeeld in categorieën om een realistisch beeld te geven van de stand van de transitie. Een overzicht hiervan is weergegeven in Tabel 8.1 (Natuur & Milieu, 2025).

Tabel 8.1 Categorieën zero-emissiebouwmaterieel

Categorie	Gewicht (ton)
Laadschoppen tot 8 ton, op banden	0,7-4,5
Laadschoppen boven 8 ton, op banden	10,5
Graafmachines mini	1,1 – 10
Graafmachines (wiel) op banden	9-11,5
Graafmachines (rups)	8,5-23
Verreikers	5
Overslagmachines	12-24

Het verbreden van de A1, waarbij 55 kilometer snelweg werd verbreed, wordt door Rijkswaterstaat gezien als een duurzaam voorbeeld voor toekomstige infraprojecten. Bij dit project werden 49 stuks zwaar elektrisch materieel ingezet (Rijkswaterstaat, 2024; Rijkswaterstaat, z.d.):

- > 2 Rupskranen
- > 2 Asfaltverdichtingswalsen
- > 4 Verreikers
- > 2 Tandemtrilwalsen
- > 2 Grond/puin verdichtingswalsen
- > 1 Rupsgraafmachine
- > 1 Mobiele graafmachine
- > 1 Mobiele draadkraan
- > 4 Shovels
- > 2 Batterijcontainers
- > 1 Aandrijfunit
- > 1 Kernboorwagen
- > 20 Vrachtwagens
- > 6 torenkranen

Deze machines waren deels omgebouwd van conventioneel naar elektrisch. Ter aanvulling zijn in Tabel 8.2 vier OEM-elektrische machines opgenomen, om een indruk te geven van het beschikbare aanbod.

Tabel 8.2 Toelichting machines.

Stuks	Soort	Merk en type	Massa (kg)	Batterij	Afbeelding	Bron
4	Verreiker	Manitou MRT 2660e	18000	Li-ion 65 kW/h / 105 Ah / 624 V		(Manitou, z.d.)
1	Rupsgraaf-machine	Hyundai HX260A L	31700	Li-ion LFP 390 kWh / 600 Ah / 650 V		(van der Spek, 2023)
1	Mobiele draadkraan	PVE EC80	72000	Li-ion LFP 260 kWh		(PV-E Crane BV, 2021)
2	Shovel	Giant G2200e	2200	LFP 13.3 kW / 260 Ah / 48V		(GIANT, z.d.)

Waar waterstofbrandstofcelaggregaten toegepast worden, worden waterstof-aangedreven bouwmachines daarentegen op een beperkte schaal toegepast. Dit komt onder andere door hoge kosten, technische complexiteit en inefficiënte energieomzetting, waardoor deze

machines momenteel nog niet rendabel zijn. Naar verwachting zal dit voorlopig zo blijven (BAM, 2022; CE Delft, 2023; Kloosterman & Jansen, 2024; Mourik, z.d.).

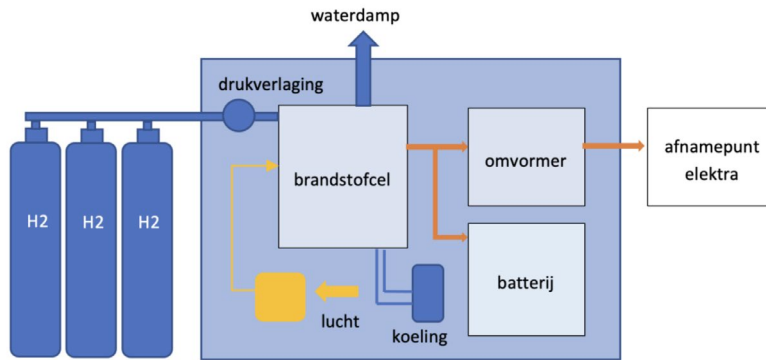
8.3 Veiligheidsrisico's elektrische zero-emissiebouwmachines

Bij conventionele bouwmachines wordt de benodigde energie opgeslagen in brandstoftanks, terwijl bij elektrische (zero-emissie)bouwmachines deze energie is opgeslagen in batterijpakketten (Hendriks et al., 2022). Het grootste veiligheidsrisico van batterijpakketten is de thermal runaway, zoals reeds besproken in paragraaf 2.4 en waarvan in Figuur 2.6 een oorzaken-en-gevolgenboom staat weergegeven. Specifiek voor bouwplaatsen zouden de volgende factoren op de geschetste risico's van invloed kunnen zijn:

- > Opladen vindt geregeld plaats op de bouwplaats buiten werkuren, wanneer er niemand aanwezig is. Hierdoor bestaat het risico dat een (dreigende) thermal runaway pas laat wordt waargenomen, wat de potentiële impact vergroot.
- > Batterijpakketten beïnvloeden de stabiliteit en daarmee de plaatsingsmogelijkheden binnen de machine. Waar conventionele motoren bijvoorbeeld 800 kg wegen en aanvullende contragewichten vereisen, kan een batterijpakket van bijvoorbeeld 2.300 kg naast energieopslag ook als contragewicht dienen. In tegenstelling tot personenauto's, bussen en vrachtwagens waar de batterijlocatie doorgaans meer vastligt, bestaat hierdoor een grotere variatie aan locaties waar batterijen in een bouwmaschine zijn geplaatst. Dit kan nadelig zijn voor een effectieve brandbestrijding omdat per keer de inzetstrategie moet worden vastgesteld.
- > Bouwplaatsen hebben veelal geen vaste structuur; indeling en ondergrond wijzigen vaak gedurende de bouwperiode, waarbij ad-hoc oplossingen voor zich voordoende problemen en moeilijkheid worden gezocht. Dit verhoogt de kans op incidenten, zoals verstoppingen van (batterij)koelsystemen door stof, onjuist gebruik van stekkers en kabels, of aanrijdingen met andere machines.
- > Hydraulische olie kan de brand verergeren.

8.4 Waterstofaggregaten

In Figuur 8.1 staat een vereenvoudigde weergave van een brandstofcelaggregaat met batterij. Binnen de waterstofketen zijn in het geval van een incident de grootste effecten te verwachten bij onderdelen waarin waterstof onder hoge druk aanwezig is, alsmede bij onderdelen waar ophoping van waterstof kan optreden. De drukhouders bevatten de grootste hoeveelheden waterstof onder de hoogste druk (vanaf ca. 200 bar). De druk in het leidingwerk verschilt ook per systeem, deze is na de drukverlaging bijvoorbeeld 25 bar. De hoeveelheid waterstof die aanwezig is kan per waterstofaggregaat verschillen, afhankelijk van het aantal aanwezige cilinders en de grootte daarvan. Daarnaast kan ophoping van waterstof plaatsvinden in de container waarin het waterstofaggregaat is geplaatst. Een ander onderdeel van een waterstofaggregaat dat gevaren kent is de lithium-ion batterij. Deze kan, zoals in paragraaf 2.4 toegelicht, in een thermal runaway raken (Spoelstra & van de Ven, 2025).



Figuur 8.1 Vereenvoudigde weergave opbouw waterstofbrandstofcelaggregaat met batterij (Spoelstra & van de Ven, 2025).

Momenteel worden op bouwplaatsen voornamelijk cilinderpakketten en waterstofcontainers toegepast, tubetrailers worden nog niet relevant geacht. Voor de nabije toekomst wordt voornamelijk gestreefd naar het gebruik van waterstofcontainers (Bouwen op Waterstof, 2025).

De veiligheidsrisico's van waterstof zijn beschreven in paragraaf 3.3.

8.4.1 Casus waterstofaggregaat

De informatie is verkregen middels een [verslag van een presentatie](#) (NIPV, 2024b) die is gegeven tijdens de 'Community of Practice waterstof(dragers)' door de bij het incident betrokken officier van dienst van de VRU³⁵.

Beschrijving incident

Op een bouwplaats waar enkel een vergunning was verleend voor grondwerkzaamheden, werd om 19:35 uur 's avonds brand gemeld door een buurtbewoner. De melder gaf aan een explosie te hebben gehoord. Het betrof een waterstofbrandstofcelaggregaat³⁶. Al snel werd duidelijk dat er twaalf waterstofcilinders die naast het aggregaat stonden werden aangestraald.

Op camerabeelden was het begin van de brand om 19:33:14 zichtbaar. Hierbij kwam veel grijze rook vrij (Figuur 8.2), dat het vermoeden geeft dat de brand het gevolg is van een thermal runaway in de batterij van het aggregaat. Na 39 seconden stond het aggregaat volledig in brand (Figuur 8.3). Drie minuten en 29 seconden na het ontstaan van de felle brand waren de vlammen afgenomen en was er alleen nog rook zichtbaar (Figuur 8.4).

³⁵ Veiligheidsregio Utrecht

³⁶ Aggregaat waarin met waterstof energie wordt opgewekt en opgeslagen in een batterij.



Figuur 8.2 Het begin van de brand (VRU, 2023).



Figuur 8.3 Het aggregaat staat volledig in brand (VRU, 2023).



Figuur 8.4 De intensiteit van de brand is afgenomen (VRU, 2023).

Na de brand waren roet- en smeltsporen zichtbaar. De deur was zichtbaar ontzet en een handvat met slot was afgebroken. Dit geeft aan dat de deur door de explosie met kracht is

opengeslagen. Van de explosie is het niet duidelijk of deze werd veroorzaakt door waterstof of rookgassen.

Incidentbestrijding

Brandweerlieden gingen, om de waterstofcilinders te koelen, afgeschermd staan achter een elektrische graafmachine die werd opgeladen door het waterstofaggregaat. Dit is te zien in Figuur 8.5. Om 20:45 werd het sein 'brandmeester' gegeven.



Figuur 8.5 Brandweerlieden koelen de waterstofcilinders (VRU, 2023).

Het batterijpakket is ook na het sein 'brandmeester' voortdurend gekoeld met water, tot er een dompelcontainer ter plaatse was waar het batterijpakket in kon worden geplaatst omdat deze in thermal runaway was. De oorzaak van de thermal runaway kon niet worden achterhaald. Het is dus niet bekend of deze is veroorzaakt door een thermische, elektrische of mechanische storing.

Geleerde lessen

De betrokken officier van dienst benoemde onderstaande leerpunten:

- > Zorg voor voldoende bluswater op een bouwplaats.
- > Het ter plaatse hebben van contactgegevens van een bedrijfsdeskundige die technische informatie kan geven over bijvoorbeeld het loskoppelen van aansluitingen.
- > Maak afspraken over het leveren van een dompelcontainer met water zodat deze in het geval van een incident zo snel als mogelijk-ter plaatse kan zijn.

9 Voorbeeldscenario's bouw

In dit hoofdstuk wordt aan de hand van drie voorbeeld-incidentscenario's de mogelijke effecten en de impact op de omgeving van incidenten met zero-emissiematerieel in de bouw bepaald, waarmee antwoord wordt gegeven op de vragen 1 en 2 uit de doelstelling.

De incidentscenario's zijn in overleg met de begeleidingscommissie vastgesteld. Op basis van deze incidentscenario's zullen relevante effecten worden beschouwd en waar mogelijk worden berekend.

Het betreft de volgende scenario's:

1. Een brand van een batterij-elektrische zero-emissieshovel (wiellader) op een bouwplaats.
2. Een incident met een klein lithium-ion aangedreven bouwwerktuig (zoals een schaarhoogwerker of minigraver) in een inpandige ruimte, bijvoorbeeld een (te renoveren) stationshal, kantoor- of bedrijfsruimte.
3. Een incident met waterstofcilinders van een aggregaat (H₂-elektrisch) op een stedelijke bouwlocatie.

9.1 Brand elektrische bouwmaschine

9.1.1 Beschrijving Incident

In dit scenario zal worden uitgegaan van brand in een wiellader (zie Figuur 9.1) op een bouwlocatie in de buitenlucht. Wielladers zijn essentieel in de bouwsector, ze worden ingezet voor diverse werkzaamheden zoals het verplaatsen van materialen, het laden van vrachtwagens en het uitvoeren van graafwerk (HVI, 2024). In deze paragraaf zullen effectafstand worden bereken indien een thermal runaway ontstaat in de batterijpakketten van een wiellader.



Figuur 9.1 Voorbeeld van een elektrische wiellader (SMT, 2025)

Karakteristieken

Enkele karakteristieken van dit voorbeeldscenario zijn:

- > dynamische, geen vaste omgeving; veel verplaatsingen ook van infrastructuur; kans op slechte (laad)verbindingen (te strakke of beschadigde kabels, versleten stekkers); veel af- en aanvoer; slordige plaatsing (geen vaste ondergrond)
- > veel verschillend materieel, veel contractors / eigenaars
- > veel omgebouwd materieel

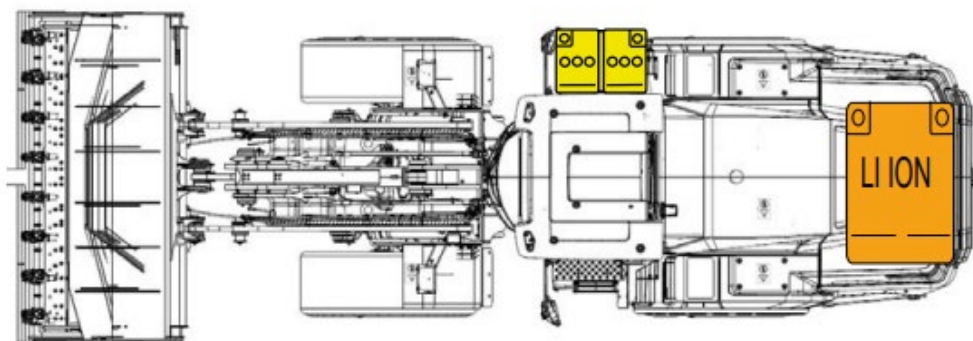
9.1.2 Uitwerking van de effecten

Om de brandlast van een wiellader te bepalen moet worden gekeken naar alle materialen waaruit de gehele wiellader is opgebouwd. Aangenomen wordt dat hoeveelheden materialen waaruit zero-emissie en conventionele bouwmaachines zijn opgebouwd, buiten de materialen voor de energievoorziening om (bijvoorbeeld bij conventioneel dieseltanks en (zero-emissie)batterijpakketten) gelijk zijn. Tabel 9.1 geeft de hoeveelheden materiaal weer voor tien verschillende diesel aangedreven type wielladers, van klein naar groot (VOLVO, 2018). De L60H is het kleinste en de L260H het grootste model. Op basis van Tabel 9.1 nemen wij aan dat de toename in brandlast bij grotere wielladers met name een gevolg is van grotere formaten banden en de toename in hoeveelheden vloeistoffen, olies en chemicaliën, waaronder bijvoorbeeld hydraulische olie. De hoeveelheden staal en ijzer nemen ook fors toe bij grotere modellen, maar dit heeft nauwelijks invloed op de brandlast. De overige elementen nemen niet of nauwelijks toe in hoeveelheid, of hebben weinig invloed op de brandlast. Bovendien zullen naar verwachting de hoeveelheden vloeistof oliën en chemicaliën voor een elektrische wiellader kleiner zijn dan voor een diesel-aangedreven type.

Tabel 9.1 Materialen wiellader (VOLVO, 2018).

Model	Staal & IJzer	Koper	Aluminium	Glas	Polymeren & rubbers	Banden	Vloeistoffen, olien & chemicalien
L60H	9145	43	40	74	184	896	410
L70H	10130	43	40	74	184	896	420
L90H	10800	43	40	74	184	896	430
L110H	13600	45	90	74	215	1224	630
L120H	13669	45	90	74	215	1200	630
L150H	18172	47	160	74	170	1728	750
L180H	18993	47	160	74	175	1728	750
L220H	22090	47	160	74	194	2732	860
L260H	24590	47	160	74	194	3920	860

De locatie van het lithium-ion batterijpakket is weergegeven in Figuur 9.2 (Volvo 2024).



Figuur 9.2 Locatie van lithium-ion batterijpakket in Volvo wiellader (Volvo, 2024)

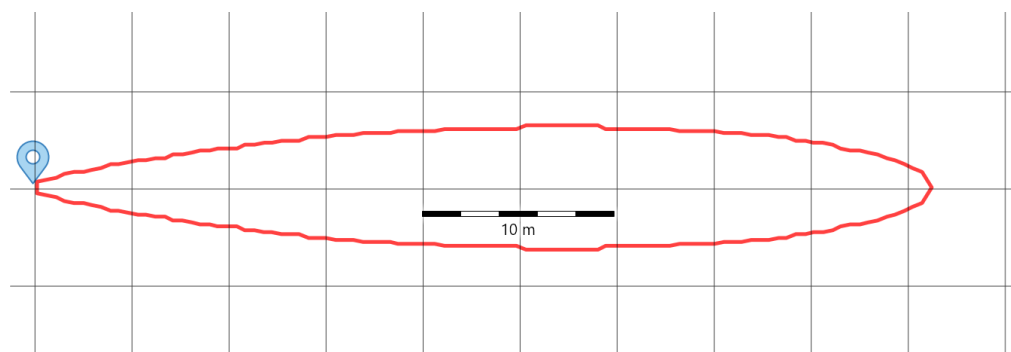
Toxische blootstelling

Voor de toxische gevolgen wordt uitgegaan van blootstelling aan waterstoffluoride (HF). Effecten als gevolg van (toxische) blootstelling aan HF worden berekend met EFFECTS (versie 12.5). Gebruikte invoerparameters (VOLVO, 2025)):

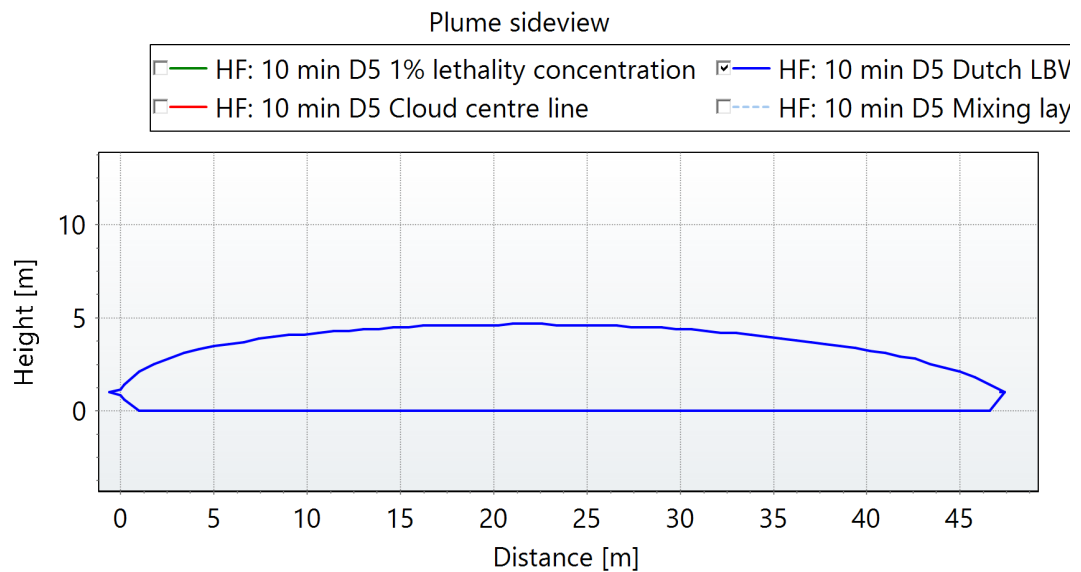
- > Batterijcapaciteit 282 kWh
- > Batterijtype LFP
- > Alle 8 batterijpakketten zitten bij elkaar op de achterzijde machine (zie Figuur 9.2)

Er wordt aangenomen dat alle batterijen in thermal runaway zullen raken en toxische gassen zullen worden gevormd die in 10 minuten vrijkomen. Volgens (Gexcon 2024) wordt per kWh batterijcapaciteit van een LFP batterij 285 mg HF gevormd. Uit 282 kWh komt in deze in 10 minuten dan in totaal: $0.285 \times 282 = 59$ gram HF vrij. Uit [onderzoek van RIVM](#) blijkt dat na 10 tot 20 minuten meer dan de helft van het waterstoffluoride uit de rook is verdwenen, doordat het zich bindt aan andere stoffen en rookdeeltjes. Daarom is de helft van hetgeen is vrijgekomen meegenomen in de dispersieberekeningen. Voor de is uitgegaan van een verstedelijkte (licht bebouwde) omgeving. Voor de verspreiding in de omgeving is uitgegaan van een neutrale atmosferische en een windsnelheid van 5 m/s. Deze omstandigheden worden in Nederlandse QRA's, vaak als representatief genomen voor overdag. Als afstandscriterium wordt de afstand gehanteerd tot waarop de concentratie van HF in de lucht is afgenomen tot de levensbedreigende waarde bij 10 minuten blootstelling. Dit is 150 mg/m^3 (RIVM, 2021), gemeten op "neushoogte" (1,5 m).

De resultaten van de berekeningen zijn in onderstaande figuren weergegeven. In Figuur 9.3 en Figuur 9.4 zijn LBW-contouren weergegeven. Op basis van de schaal in Figuur 9.3 blijkt dat de afstand tot de LBW-concentratie 46 m bedraagt. Voor 1 minuut blootstelling is de LBW-waarde 938 mg/m^3 . Deze ligt op 16 m vanaf het punt waar de HF vrijkomt.



Figuur 9.3 Boven-aanzicht toxische wolk HF (150 mg/m^3 contour).



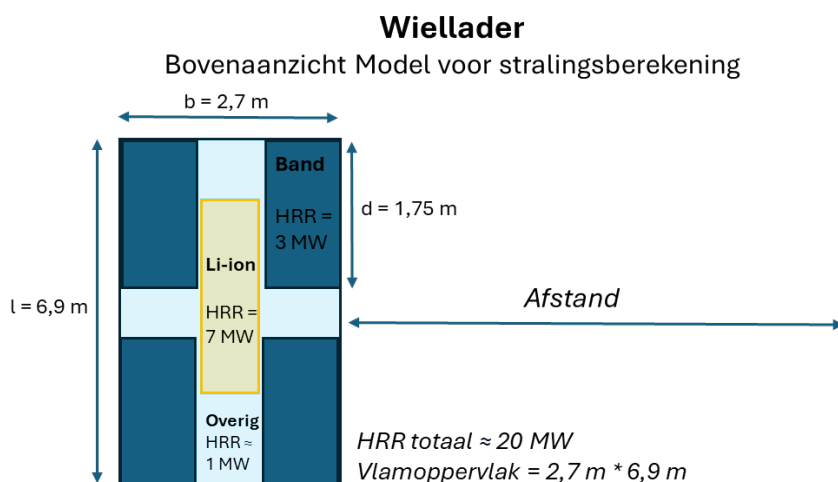
Figuur 9.4 Zijaanzicht toxische wolk HF (150 mg/m³ contour).

Brand

Wij concluderen dat de kennis over brandontwikkeling in bouwvoertuigen beperkt is. Er zijn slechts enkele grootschalige tests uitgevoerd, waardoor onze studie grotendeels afhankelijk is van berekeningen en schattingen. Het grootste risico op brand ontstaat door olielekken uit hydraulische slangen die ontbranden op hete oppervlakken. Dit leidt tot snelle brandverspreiding via warmtestraling naar andere brandbare onderdelen, zoals banden, die een belangrijk deel vormen van de brandbare massa (zie Tabel 9.1) en veel rook en hitte produceren (Ingason et al., 2010). Volgens (Ingason et al., 2010) kan een band (met ca. 400 kg aan brandbare massa) van een wiellader een maximaal brandvermogen (peak Heat Release Rate of pHRR) van 3 MW bereiken. Voor 4 banden zou dit 12 MW betekenen. Dit is ongeveer gelijk aan de waarde die volgens de rekenmodellen van (Ingason et al., 2010) een brandende diesel aangedreven wiellader zal genereren nl. zo'n 12 à 13 MW. Andere brandbare onderdelen (vloeistoffen, oliën, vetten, rubbers, polymeren) zullen bijdragen aan de totale brandlast maar de piekwaarde neemt nauwelijks toe. Dit zal zeker te maken hebben met de (verschillende) tijdstippen waarop de brandbare onderdelen de pHRR bereiken. Het is moeilijk te zeggen in hoeverre dit brandverloop ook geldt voor batterij-aangedreven wielladers. Het piek-brandvermogen van de batterijen kan worden berekend met onderstaande formule, waarin de batterijcapaciteit E wordt uitgedrukt in Wh (Willstrand et al., 2020):

$$pHRR (kW) = 1,56E^{0,67}$$

Voor de 282 kWh batterij in de wiellader leidt dit tot een pHRR van 7 MW. Als we (conservatief) aannemen dat de pHRR samenvalt met die van de rest van de wiellader (zeg 13 MW) zal de pHRR voor de elektrische wiellader uitkomen op ca. 20 MW. Met een door NIPV ontwikkeld model (NIPV, 2024) kan dan het verband tussen de warmtestraling en de afstand tot de wiellader worden berekend. Hierbij zijn de verschillende brandbare componenten geometrisch samengevoegd als weergegeven in Figuur 9.5.

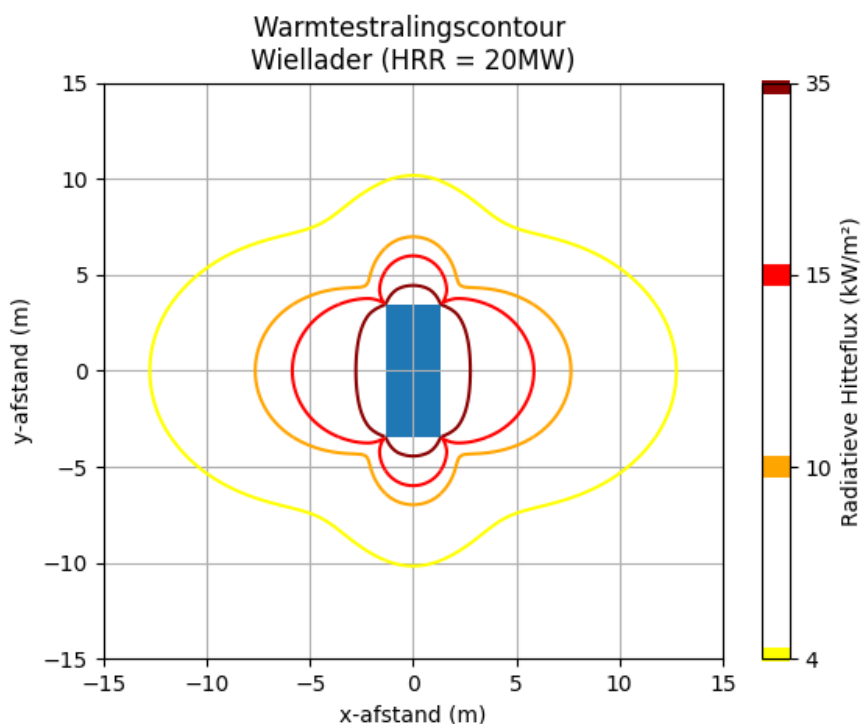


Figuur 9.5 Bovenaanzicht van uit brandbare componenten samengestelde wiellader.

Verder zijn de volgende invoerwaardes gebruikt in het model:

- > Stralingsfractie: 0,45
- > Lengte x breedte voertuig: 6,90 m x 2,70 m;
- > Transmissiviteit van lucht = 1 (lucht absorbeert geen straling).

Voor vier stralingsniveaus zijn contouren rond de wiellader weergegeven in Figuur 9.6.

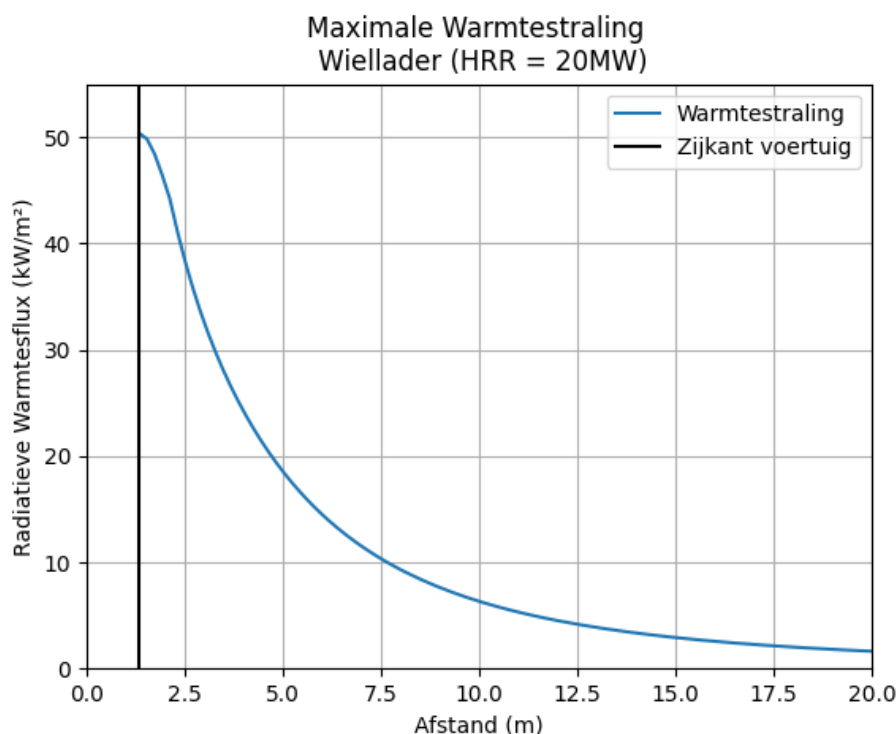


Figuur 9.6 Warmtestralingscontouren wiellader

Een warmtestralingsniveau van 35 kW/m² of meer zal direct tot letaal letsel leiden. Ook wordt ervan uitgegaan dat bij dit stralingsniveau secundaire branden ontstaan. Echter hout en kunststoffen kunnen al bij 15 kW/m² ontbranden. Bij blootstelling aan stralingsniveaus van minder dan 10 kW/m² zal men in het algemeen nog in staat zijn om te vluchten, zodat geen letaal letsel zal optreden. Een stralingsniveau van 4 kW/m² wordt als grens gehanteerd

voor het optreden van de brandweer met beschermende brandweerkleding, die voldoet aan NEN-EN 469.

De warmtestraling als functie van de afstand tot de wiellader is weergegeven in Figuur 9.7. Vanaf ruim 6 m van de wiellader is van een “veilige” afstand (10 kW/m^2) sprake, d.w.z. er zullen geen letale brandwonden meer ontstaan. Brandoverslag (15 kW/m^2) naar brandbare objecten kan optreden tot op ca 5 m vanaf de brandende wiellader.

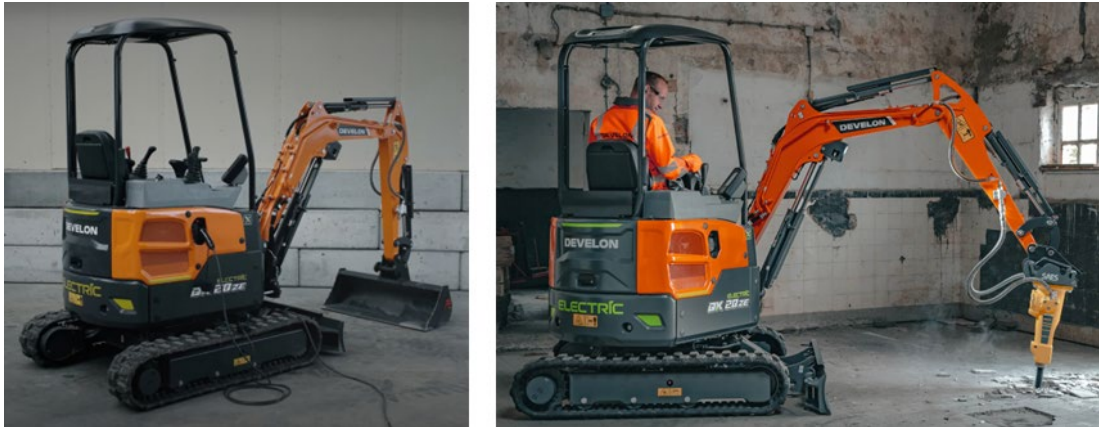


Figuur 9.7 Warmtestraling versus afstand tot hartlijn wiellader.

9.2 Kleine elektrische graafmachine inpandig

9.2.1 Beschrijving Incident

Elektrische bouwmaschinen kunnen ook inpandig worden toegepast. De (relatief) gesloten structuren van inpandige ruimtes kunnen invloed hebben op het incidentverloop en de gevolgen. Om de effecten te bepalen wordt in dit scenario uitgegaan van een kleine elektrische graafmachine (zie Figuur 9.8) in een inpandige ruimte, bijv. bij renovatie van een appartementen- of kantorencomplex. Het voertuig is voorzien van een lithium-ion batterij en wordt intensief gebruikt, met af en toe bijladen op locatie. Tijdens gebruik raakt het batterijpakket oververhit, mogelijk door interne kortsluiting of onopgemerkte eerdere schade, en een thermal runaway ontstaat. Hierdoor komen toxische gassen vrij en vat het voertuig vlam.



Figuur 9.8 Kleine elektrische graafmachine (Develon, 2025)

Karakteristieken

Enkele karakteristieken van dit voorbeeldscenario zijn:

- > In besloten kleine omgeving; verhoogde kans op aanrijdingen en snel vullen van ruimte met rook / brandbare en toxische gassen
- > Weinig ruimte om veilige afstand te houden
- > Vrij dynamische omgeving (locatie van spullen, veel aan- en afvoer van materieel)
- > Meerdere contractors

9.2.2 Uitwerking van de effecten

Toxisch

Door de overkapping en relatief gesloten structuur hopen gassen zich op in de ruimte. Specifiek voor inpandige ruimten moet daarom aandacht uitgaan naar de toxische gassen die vrijkomen, die al in een lage dosis schadelijk zijn (zie Tabel 2.2). Er komen zowel gassen vrij die zwaarder als lichter dan lucht zijn. Naar verwachting kunnen gassen zich daarom door de gehele inpandige ruimte verspreiden. Voor de toxische gevolgen wordt weer uitgegaan van blootstelling aan waterstoffluoride (HF). Effecten als gevolg van (toxische) blootstelling aan HF worden berekend met EFFECTS (versie 12.5). Gebruikte invoerparameters:

- > Batterijcapaciteit 20 kWh (Develon, 2025, zie ook Tabel 9.2)
- > Batterijtype LFP (aannname NIPV)

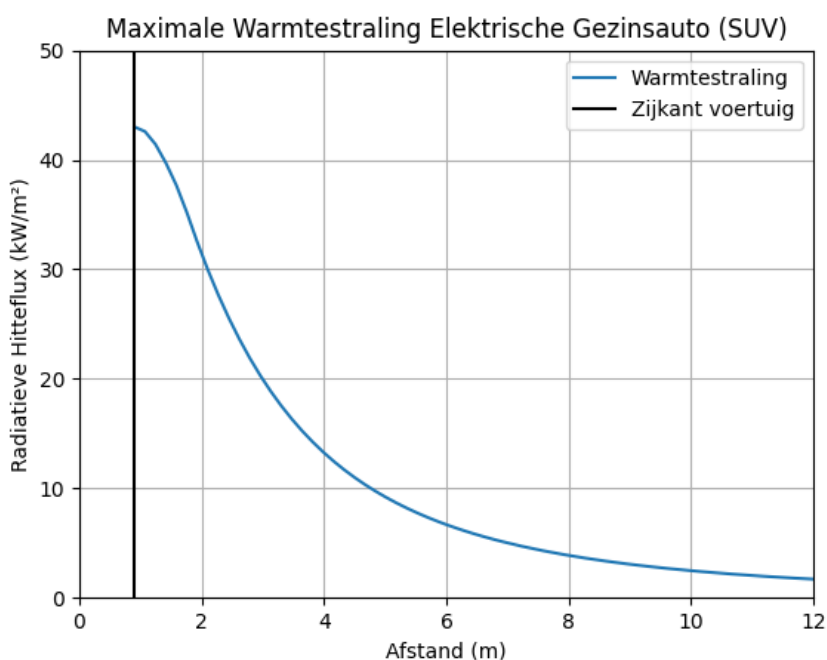
Er wordt aangenomen het hele batterijpakket in thermal runaway zal raken en toxische gassen zullen worden gevormd die in 10 minuten vrijkomen. Volgens (Gexcon, 2024) wordt per kWh batterijcapaciteit van een LFP batterij 285 mg HF gevormd. Met een batterijcapaciteit van 20 kWh wordt er dan 5700 mg HF gevormd. Doordat HF zich bindt aan andere stoffen en rookdeeltjes is er vanuit gegaan dat de helft van hetgeen is vrijgekomen zich in de ruimte zal verspreiden (zie ook vorige scenario). Als gezondheidscriterium wordt weer de levensbedreigende waarde (LBW) bij 10 minuten blootstelling gebruikt, van 150 mg/m³ genomen (RIVM, 2021). Bij homogene verdunning zal dan in een volume van $5700/2/150 = \text{ca. } 20 \text{ m}^3$ de concentratie boven de LBW zijn, ofwel tot op 1 m rondom het werktuig. Snel vluchten (met name door de bediener van de graafmachine) ligt voor de hand. Wij nemen aan dat de snelle rookontwikkeling die vaak wordt waargenomen bij het begin of vlak voor een thermal runaway een groter gevaar vormt, met het oog op verstikking en het wegnemen van het zicht (op de vluchtweg).

Brand

In vergelijking met een personenauto heeft het elektrisch bouwmaterieel dat in pandig zal worden ingezet een relatief kleine batterijcapaciteit per kg voertuiggewicht (zie Tabel 9.2). De batterijbrand zal dan ook minder ernstig zijn in vergelijking met een elektrische gezinsauto. Verder genereren het interieur en plastics de grootste brandlast en hitte op de piek van de brand. Een elektrische bouwmachine heeft echter minder stoelen en zodoende een kleiner voertuiginterieur. Het valt dan ook te verwachten dat de hittestraling van een brandende kleine elektrische graafmachine of hoogwerker met specificaties als in Tabel 9.2 naar verwachting kleiner zal zijn dan van een elektrische gezinsauto (zie warmtestralingscontour Figuur 9.9 (Brans & Reinders, 2024)). Omdat experimenteel vastgestelde brandparameters van een elektrische bouwmachine verder ontbreken is in dit scenario de warmtestraling van een elektrische gezinsauto (SUV) als maatstaf genomen voor een kleine elektrische bouwmachine.

Tabel 9.2 Eigenschappen van enkele kleine bouwwerktuigen, vergeleken met een SUV

Werktuig	Massa (kg)	Batterijcapaciteit (kWh)	Lengte (m)	Breedte (m)	Heat Release Rate (MW0)
Elektrische SUV (brandexperiment)	1685	64	4,2	1,8	7,25 ± 0,7
Elektrische hoogwerker	2200	14	2,5	1,2	onbekend
Elektrische schaarlift	2180	5,4	2,5	0,8	onbekend
Kleine elektrische graafmachine	1941	20	3,5	1,4	onbekend



Figuur 9.9: Warmtestraling elektrische auto

Tot op ca. 2,5 m vanaf de machine kan brandoverslag optreden en tot op ca 4 m kunnen letale brandwonden optreden.

9.3 Waterstofaggregaat

9.3.1 Beschrijving Incident

Een ISO-container met een aantal cilinders waterstof wordt verhit door een externe brand. Hierdoor warmen (een of meerdere) cilinders op. Bij 110 °C gaan een of meerder TPRDs open en waterstof wordt met grote kracht naar buiten geblazen. Dit ontsteekt meteen (door de externe brand) en een of meerdere fakkels zijn het gevolg.

Karakteristieken

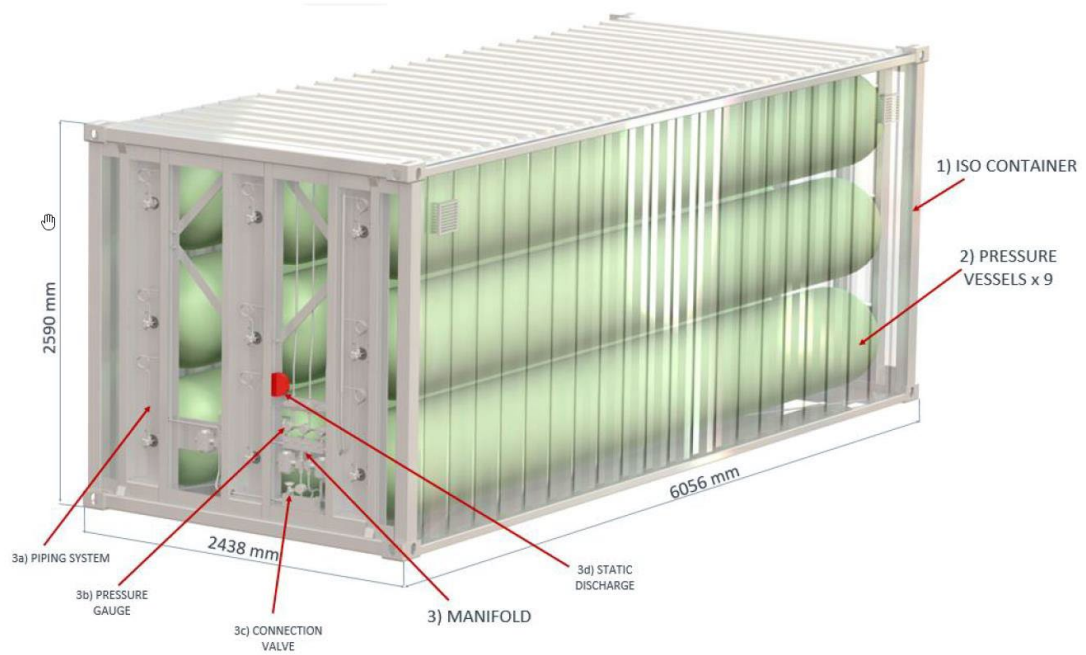
Enkele karakteristieken van dit incident zijn:

- > Op bouwplaats: geen vaste ondergrond; veel verplaatsingen, verhoogde kans op aanrijdingen / beschadigingen ook verhoogde kans op ondeugdelijke aansluitingen (lekken, gasophoping)
- > Mogelijk interactie met batterijen

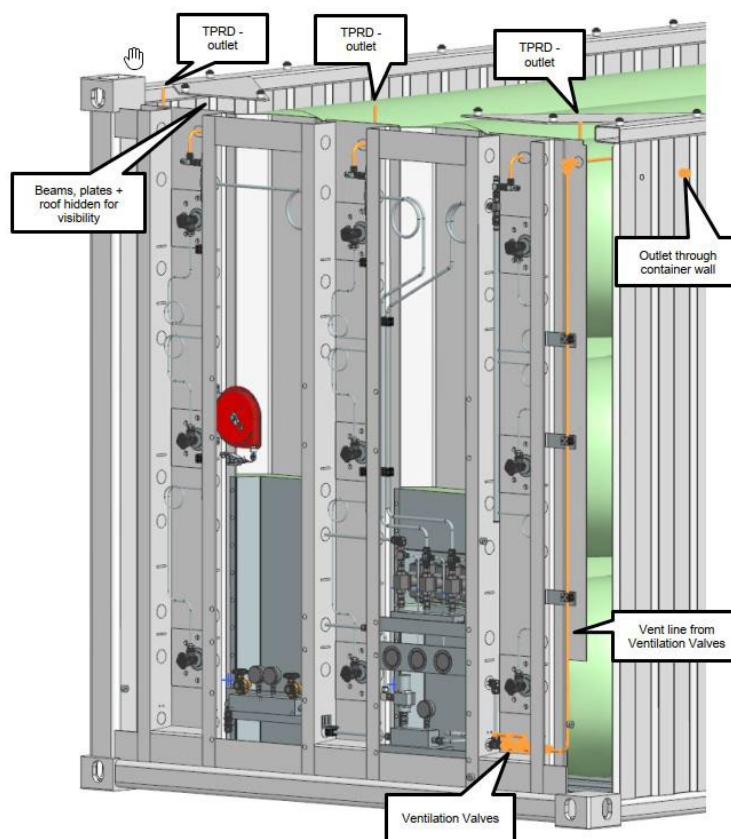
9.3.2 Uitwerking van de effecten

Een TPRD is, zoals in paragraaf 3.3 toegelicht, een beveiliging die het exploderen van een waterstoftank door een te grote druk voorkomt. Beschadigingen door impact aan een waterstoftank waardoor deze explosief zou kunnen falen zijn door de vele veiligheidseisen voor de sterkte van de tanks niet te verwachten (van Harn & Hessels, 2024).

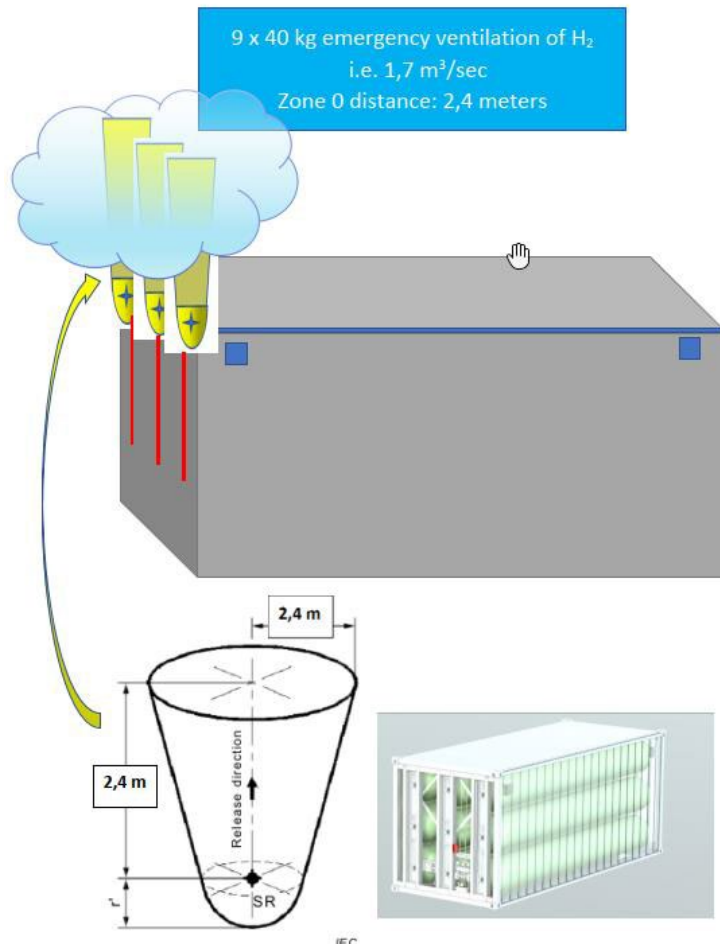
Waterstofcontainers kunnen verschillende hoeveelheden waterstof bevatten (Bouwen op Waterstof, 2025). Een voorbeeld is gegeven in Figuur 9.10, waarin een container in totaal negen horizontaal geplaatste waterstof cilinders bevat. In Figuur 9.11 is te zien dat per drie cilinders één TPRD is geplaatst die bij een temperatuur van 110 °C in werking treedt en de waterstof omhoog afblaast. Indien de tank afblaast, zal er, na ontsteking, een omhoog gerichte fakkel van 2,4 meter ontstaan, zoals te zien in Figuur 9.12.



Figuur 9.10 Waterstofcontainer (ROGER Energy, 2024).



Figuur 9.11 Waterstofcontainer TPRD outlets (ROGER Energy, 2024).



Figuur 9.12 Waterstofffakkel (ROGER Energy, 2024).

Deze fakkel zal geen schade aanrichten indien er zich geen brandbare objecten binnen of op korte afstand (zeg binnen de 15 kW/m² contour op ca. 1 – 1,5 m) van de fakkel bevinden.

10 Maatregelen voor brandveiligheid bouw

In hoofdstuk 9 zijn drie voorbeeldscenario's beschreven, waarbij mogelijke ongewenste gebeurtenissen en gevolgen uitgewerkt zijn voor zero-emissiematerieel in de bouwsector. In dit hoofdstuk worden de mogelijke maatregelen aangegeven voor de sector bouw (vraag 3). Dit is op dezelfde wijze gebeurd als voor de sector logistiek.

In Tabel 10.1 is, op basis van de in Bijlage 2 toegelichte bronnen, een overzicht gegeven van de maatregelen, uitgewerkt naar type (ontwerp, bouwkundig/ruimtelijk, installatietechnisch en organisatie) en onderscheiden naar de karakteristieken voor de sector in hoofdstuk 9 (kolom twee en drie) zoals beschreven bij de voorbeeldscenario's. Met een kruisje (x) is aangegeven waarop ze van toepassing zijn. De laatste kolom geeft een toelichting op de gevonden maatregelen.

Ook bij bouw kunnen de maatregelen voor busremises / -laadinstallaties (CROW, 2022a, 2022b, 2023) als voorbeeld dienen. Aandacht voor brandoverslag door afstand te houden (als er ruimte is - buiten) of plaatsen van brandwerende voorzieningen (als er onvoldoende ruimte is - inpandig) is weer van groot belang. Een samenvatting van de afstanden tot waarop brandoverslag kan optreden (naar hout en kunststof e.d.) bij brand van Lithium-ion bevattende systemen is gegeven in Tabel 6.2.

Waterstoffakkels uit de TPRD zullen in het algemeen naar boven zijn gericht, waardoor op "grondniveau" geen schade zal ontstaan. Op grotere hoogte kan wel brandoverslag optreden, met name indien de fakkel wordt afgebogen door de wind. Dit zal afhankelijk zijn van de grootte van de opening van de TPRD. In het voorbeeld van een BES (een ISO-container) met opening van 4 mm kan op ca 6 m hoogte tot op ca. 1,5 m (horizontaal gemeten vanaf het afblaaspunt) brandoverslag optreden. Een kleinere opening van de TPRD, zal deze afstand beperken, maar de fakkel zal daardoor wel langer aanhouden (hoewel dit probleem met meerdere TPRDs kan worden aangepakt).

Indien waterstofcilinders in of nabij gebouwen of andere brandbare systemen worden gebruikt, dient met zich ervan te vergewissen dat een eventuele fakkel geen brand kan veroorzaken. Bij voorkeur informeert men bij de fabrikant of leverancier naar de veiligheidsafstanden. Mocht deze informatie niet beschikbaar zijn dan geeft Tabel 6.3 hiervan een indicatie. Deze tabel geeft de fakkellengtes en de afstand tot het 15 kW/m² stralingsniveau in het verlengde van een verticale waterstoffakkel voor een aantal drukken en uitstroomopeningen. Deze ruimte boven de TPRD dient vrij gehouden te worden. Afbuigen van de fakkel door de wind is hierbij niet meegenomen.

Bij preventie moet er aandacht zijn voor goed onderhoud, controle op en voorkoming van eventuele schade (en eventueel in quarantaine zetten van verdacht materieel), een goed (ontworpen en werkend) en up-to-date BMS en monitoring van het laadproces. Gezien de dynamische omgeving van een bouwplaats die a.h.w. voortdurend opnieuw wordt ingericht

met veranderende lay-out en aan- en afvoerroutes is het van bijzonder belang om alle installatieonderdelen die bij de energievoorziening van belang zijn regelmatig te controleren. Denk hierbij aan kabels, stekkers en laadpalen die mogelijk zijn beschadigd door overrijden, aanrijden of als gevolg van een niet-stabiele ondergrond zijn verschoven of verzakt. Maar ook de batterijpakketten, waarmee mogelijk tijdens het gebruik van de bouwmachines tegen onderdelen op de bouwplaats is gestoten, moeten regelmatig worden nagezien op beschadigingen.

Externe hitte- of gassensoren waarmee een (dreigende of beginnende) thermal runaway kan worden gedetecteerd zullen mogelijk (ook) mobiel zijn waardoor hun locatie ten opzichte van de mogelijke bron kan veranderen. Bij interne locaties moet er aandacht zijn voor het voorkomen van gasophoping.

Bij bouwprojecten binnen zal bijzondere aandacht moeten zijn voor (zelf)redzaamheid en hulpverlening, mocht er toch brand uitbreken. Er zal nog geen sprake zijn van vaste systemen (brandmelders, sprinklers, bewegwijzerde vluchtroutes, ventilatie e.d.). Het is hier dan ook van belang dat deze aspecten regelmatig opnieuw worden bekeken en besproken met alle bij de bouwwerkzaamheden betrokkenen, en eventueel personen die (in andere delen van het gebouw) nog aanwezig kunnen zijn.

Verder is voor BEVs, een ruime en gedurende langere tijd beschikbare, hoeveelheid bluswater essentieel.

Een ontwerp met de mogelijkheid tot snel en veilig demonteren van een batterijpakket zou een effectieve beheersmaatregel kunnen zijn, zeker bij groot materieel dat niet in een dompelbak past³⁷.

³⁷ Omgebouwd materieel zou wat dit betreft zelfs voordelen kunnen hebben ten opzicht van OEM-producten, aangezien “esthetisch” wegwerken van batterijen hier waarschijnlijk van minder belang is.

Tabel 10.1 Overzicht maatregelen bouw

Maatregel type	locatie		Aandrijf-vorm		maatregel	Toelichting
	Inpandig, klein	Open bouwlocatie	BEV	FCEV		
Werktuig	x	x	x	x	Ontwerp volgens standaarden	> Alleen gecertificeerde elektrische werktuigen gebruiken met intacte BMS-systemen. > Exploitant zorgt voor duidelijke gebruikers- en onderhoudshandleidingen met uitleg over waarschuwingssignalen. > Voorzie het voertuig van een ABC-brandblusser op een gemakkelijk bereikbare locatie. > Indien er waterstof aanwezig is op de bouwplaats, maak dit duidelijk.
		x	x		Demontage batterijen	> Dit zal door de fabrikant mogelijk moeten worden gemaakt
	x	x	x	x	Controle en onderhoud van voertuigen	> Visuele inspectie van kabels, connectoren en batterijpakket voor aanvang van de klus. > Laat periodiek onderhoud uitvoeren door een erkende partij.
	x	x	x		Gebruik van BMS en laadinfra (IT) data; zorg voor software updates	> Temperatuurmonitoring met waarschuwing via BMS of mobiele apps. > Toezicht op laadproces via laadinfra of BMS.
	x	x	x		Aanrijbscherming	> Overweeg extra aanrijdbeveiliging op het voertuig.
	x	x	x		temperatuur en gassensoren	> Installeer (tijdelijke) gas- en rookdetectie met doormelding naar brandweer. > Waterstofgasdetectie. > Warmtebeeldcamera.
	x	x	x	x	Mogelijkheden voor directe toegang bluswater tot accupakket (via bijv. lansen)	> Richt de bouwplaats in met bluswatervoorzieningen. > Zorg voor voldoende bluswater op bouwplaatsen.
	x	x	x		Mogelijkheid tot snelle elektrische isolatie van batterijpakket	> Zorg dat personen op locatie weten waar de noodknop van het aggregaat zich bevindt.
	x	x	x		Batterij-intern vroegtijdig detectiesysteem	> Temperatuurmonitoring met waarschuwing via BMS of mobiele apps.
	x	x	x		Batterij-intern blussysteem	>
	x			x	Geen holle ruimtes nabij waterstofinstallatie	> Vermijd ophoping van waterstofgas in besloten ruimtes.
			x	x	Voldoende afstand of brandwerend systeem tussen batterij en TPRD	> Batterijen of apparaten/machines die batterijen bevatten, op afstand van de waterstofopslag houden zodat deze bij brand geen aanstraling veroorzaken. > Geef deze afstand aan met bijvoorbeeld pionnen.

Maatregel type	locatie		Aandrijf- vorm		maatregel	Toelichting
	Inpandig, klein	Open bouwlocatie	BEV	FCEV		
bouwkundig / ruimtelijk			x	x	Brandwerend beschermen constructie-elementen	> Plaats de opstelling op een stabiele en onbrandbare ondergrond. > Gebruik brandwerende voorzieningen bij opslag van batterijen of voertuigen nabij brandbare objecten.
			x	x	Aanrijbeveiliging	
						> Probeer het laden van machines altijd zo ver als mogelijk van andere objecten te doen. > Vermijd opladen in besloten ruimtes zoveel als mogelijk. > Organiseer periodieke veiligheidsrondes door BHV'er of veiligheidscoördinator. > Houd batterij(machines) zoveel als mogelijk afstand tot brandbare bouwmaterialen. > Voer geen warme werkzaamheden uit rondom de ATEX-zonering.
	x	x	x	x	Overzichtelijke indeling	> Oefen ontruiming vooraf met bouw personeel en beheerder van de ruimte. > Zorg dat personen weten dat zij bij (het vermoeden van) een incident 50 meter afstand moeten nemen en anderen hierover instrueren.
					Beperken van vluchttijd en borgen van vluchtcapaciteit	> Werkplan met duidelijke vluchtroutes en ontruimingsprocedures. > Creëer meerdere goed gemarkeerde vluchtroutes.
	x	x	x	x	afscherming van (ladend) werktuig of afstand naar omgeving	
					voldoende afstand tot brandbare voorwerpen of aangrenzende voorwerpen of bouwwerken	
	x	x	x	X	Geen ontstekingsbronnen rond drukaflaatsystemen	> Indien een waterstofgas vrijkomt uit een drukaflaatsysteem en niet direct ontsteekt kan er net buiten de opening een explosieve atmosfeer aanwezig zijn. Hierbinnen mogen geen ontstekingsbronnen aanwezig zijn (ATEX zone). De fabrikant / leverancier dient hierover informatie te verschaffen.
	x	x		x		> Richt de bouwplaats in met bluswatervoorzieningen. > Zorg voor minimaal 80 m ³ /uur bluswater gedurende een periode van vier uur.
	x	x	x	x	zorg voor voldoende bluswater	> Plaats brandwerende voorzieningen tussen voer- of werktuig en brandbare objecten, bijvoorbeeld volgens PGS 37-1.
	x	x	x		plaats brandwerende voorzieningen tussen voertuig en brandbare objecten	

Maatregel type	locatie		Aandrijf-vorm		maatregel	Toelichting
	Inpandig, Klein	Open bouwlocatie	BEV	FCEV		
	x	x	x	x	zorg voor voldoende vluchtroutes	> Creëer meerdere goed gemarkeerde vluchtroutes. > Werkplan met vluchtroutes en ontruimingsprocedures.
	x	x	x	x	zorg voor goede aanrijroute brandweer	> Realiseer bereikbaarheid voor hulpdiensten. > Zorg voor goede aanrijroute brandweer.
		x	x		zorg voor goede duidelijke signalering / verkeerscirculatie / aanrijbescherming	> Maak met bestickering duidelijk dat een machine elektrisch is en een lithium-ion batterij bevat. > Maak duidelijk dat waterstof aanwezig is op de bouwplaats middels borden. > Overweeg aanrijdbeveiliging.
	x			x	Vluchtroutes beschermen tegen impact van explosie	
installatie	x	x	x	x	Ontwerp volgens standaarden	
	x	x	x	x	onderhoud conform opgave fabrikant	> Laat periodiek onderhoud uitvoeren door een erkende partij. > Gebruik originele laders en batterijen.
		x	x		frequente controle Laadinfra (laders, kabels, stekkers)	> Visuele inspectie van kabels, connectoren en batterijpakket voor aanvang van de klus. > Zie handreiking veilig gebruik van openbare laadpalen voor de bouw ³⁸
	x	x	x		warmtebeeldcamera	> Warmtebeeldcamera voor temperatuurmonitoring.
	x		x	x	Brandmeldinstallatie (detectie)	> Installeer gas- en rookdetectie met doormelding naar brandweer. > Denk na over ventilatiestrategieën.
	x	x		x	Waterstofgasdetectie	> Waterstofgasdetectie plaatsen.
	x	x		x	Afstand tussen waterstofopslag en batterij van waterstofaggregaat	> Uit de in paragraaf 8.4.1 beschreven casuïstiek blijkt dat een brand, die hoogstwaarschijnlijk is ontstaan door het in thermal runaway raken van de lithium-ion batterij, de waterstofcilinders/installatie kan aanstralen. Hierdoor kunnen mogelijk faaloorzaken ontstaan waardoor gasvormig waterstof kan vrijkomen.
organisatie	x	x	x	x	noodplan / rescue sheets	> Rescue sheets van machines op de bouwplaats zijn voor de brandweer bereikbaar, ook buiten werktijden.

³⁸ https://nknederland.nl/wp-content/uploads/2023/05/Handreiking-veilig-gebruik-van-openbare-laadpalen-voor-de-bouw_DEF.pdf

Maatregel type	locatie		Aandrijf-vorm		maatregel	Toelichting
	Inpandig, Klein	Open bouwlocatie	BEV	FCEV		
						> Calamiteitenplan en -organisatie voor optreden bij incidenten. > Contactgegevens van een bedrijfsdeskundige binnen het bereik van de brandweer die technische informatie over installaties/machines kan geven (over bijvoorbeeld het loskoppelen van waterstofbundels). > De initiatiefnemer moet een calamiteitenplan en -organisatie hebben. > Indien geen rescue sheets bij de machine/het voertuig zijn geleverd, zijn er richtlijnen voor het opstellen³⁹. > Maak afspraken over het snel ter plaatse kunnen verkrijgen van een dompelcontainer.
						> Speciaal ingerichte plaats voor voertuigen met een verhoogde kans op een thermal runaway: - Impact op het batterijpakket - Langdurig contact met water - Signalen afgegeven door het BMS > Quarantaineplaats bevindt zich op 15 meter afstand van andere objecten en voorzien van: - Warmtebeeldcamerasysteem gericht op locatie waar zero-emissievrachtwagens opladen, die bij het waarnemen van een abnormale temperatuur een waarschuwingssignaal uitzendt. > Snelle toegang tot bluswater. > Overweeg plaatsing van brandwerende scheidingen tussen voertuigen, laadvoorzieningen en rondom quarantaineplaats. Hoogte en lengte gelijk aan de betrokken voertuigen.
	x	x	x		Quarantaineplaats werktuigen met instabiele batterij	
	x	x	x	x	Omgeving wijzen op bijzondere aspecten	> Omstanders weten dat zij afstand moeten nemen bij incidenten.
	x	x	x	x	Opleiding van personeel	> Maak duidelijk dat er waterstof of batterijen aanwezig zijn middels borden en bestickering. > Alleen geïnstrueerd personeel voert handelingen uit nabij waterstofaggregaat. > Herkennen gevaren van batterijen en waterstof (paragraaf 3.3 & 2.4).

³⁹ <https://www.energysafety.info/info-for-manufactures>

Maatregel type	locatie		Aandrijf- vorm		maatregel	Toelichting
	Inpandig, klein	Open bouwlocatie	BEV	FCEV		
						> Weet welke meldingen die kunnen duiden op een oververhit batterijpakket het BMS kan weergeven. > Herkennen van signalen of oorzaken die wijzen op, of kunnen leiden tot een mogelijke thermal runaway (paragraaf 2.4 & 11.1.1). > Weet hoe te handelen en wie benaderd moeten worden bij een incident (paragraaf 11.1.1 & 11.3.1). > Weten dat een waterstofbrand nooit geblust mag worden. > Kent procedures voor het opladen van het batterijpakket van de bijbehorende machine en de instructies van behorend bij de gebruikte laadinfrastructuur: - Aankoppelen en afkoppelen stekker. - Locatie noodstops. > Is op de hoogte van de kwetsbaarheid van laadstekkers en weet waar deze nadien opgeborgen dient te worden. > Toezicht via BMS of laadinfra. > Inspecteer laadinfrastructuur voor aanvang van het bouwproject, en vervolgens geregeld op beschadigingen en het gebruik van juiste kabels en stekkers. Stel hier protocollen voor op. > Overweeg thermische bewaking gedurende het laadproces met een warmtebeeldcamerasysteem, gericht op locatie waar bouwmachines opladen, die bij het waarnemen van een abnormale temperatuur een waarschuwingssignaal uitzend.
	x	x	x		Toezicht op laadproces	
				x	Rookverbod en verbod op ontstekingsbronnen	> Houd rekening met potentiële ontstekingsbronnen zoals auto's en telefoons.
				x	plaats voertuig niet onder afdak	> Laad bouwmachines bij voorkeur in de open lucht.
					goede communicatie en afspraken tussen de	> Goede afspraken en communicatie over veiligheid en procedures tussen contractors.
	x	x	x	x	contractors, de omgevings- en hulpdiensten	> Hulpdiensten worden door de omgevingsdienst op de hoogte gebracht van de plaatsing van een waterstofinstallatie, de hoeveelheid waterstof die aanwezig is op de locatie en wie zij moeten benaderen in het geval van een incident.

11 Incidentmanagement bouw

In dit hoofdstuk worden de vragen 4 ten 6 beantwoord voor de sector bouw0, waarbij een handelingsperspectief voor incidentbestrijding wordt opgesteld en wordt ingegaan op (langdurig) veilig stellen van materieel (nazorg). Hiervoor is gebruik gemaakt van eerdere kaders, beschreven in paragraaf 7.1, en expertise van onderzoekers.

Incidentbestrijding is uitgewerkt aan de hand van vijf fasen:

- > Alarmeren en uitruk: de fase van de start van een incident, van alarmering tot aan aankomst van de brandweer.
- > Herkennen: de fase van aankomst van de brandweer waarin het voertuig moet worden herkend als een zero-emissievoertuig.
- > Verkennen: de verkenningsfase van het incident, waarbij de mogelijkheden van en voorwaarden voor brandweerinzet worden bekeken.
- > Stabiliseren: de fase waarin de handelingen worden verricht om het incident te stabiliseren en escalatie te voorkomen.
- > Bestrijden: het incident wordt bestreden, bijvoorbeeld door het blussen van een brand.

Nazorg omvat de afwikkeling van het incident, waaronder:

- > Veilige berging
- > Zoveel mogelijk beperken van overlast (vrij maken van weg bijvoorbeeld)
- > Langdurig veilig stellen van verbrande voertuigen.

Indien de volgorde waarin handelingen worden uitgevoerd van belang is, zijn de opsommingstekens (>) vervangen door nummers.

Bij het opstellen van dit hoofdstuk is tevens gebruikgemaakt van aanvullende documentatie van voertuigspecifieke rescue sheets en technische informatie, zoals genoemd in hoofdstuk 4.

11.1 Incidentmanagement elektrische bouwmaschine

In deze paragraaf wordt ingegaan op een incident bij elektrisch aangedreven bouwmaschine. Daarbij valt te denken aan een elektrische graafmachine.

Bij dit scenario hebben vier verschillende personen/partijen een rol hebben in het incidentmanagement:

- > Waarnemer(s) incident: de persoon of personen die het incident waarnemen.
- > Bedrijfsdeskundige vanuit initiatiefnemer: persoon met kennis over de opstelling. Deze is op de hoogte van hoe aansluitingen losgekoppeld kunnen worden en wat meldingen van het systeem inhouden.
- > Brandweer: repressieve incidentbestrijding.
- > Bergers: verplaatsen de machine na het incident naar een veilige locatie.

Er zijn twee soorten incidenttypes mogelijk:

1. Ongeval
2. Brand

Waar nodig zal het onderscheid tussen beide mogelijke situaties worden gemaakt.

In de fases herkennen, verkennen, stabiliseren en bestrijden heeft alleen de brandweer een rol.

11.1.1 Alarmeren

Waarnemer(s) incident

1. Neemt contact op met de brandweer en brengt de bedrijfsdeskundige met kennis over de installatie op de hoogte.
2. Brengt, indien van toepassing, laadbak naar beneden⁴⁰
3. Zet de versnelling in neutraal/activeer de parkeerknop⁴⁰
4. Trek de handrem aan⁴⁰
5. Schakel het apparaat uit met de sleutel en verwijder deze⁴⁰
6. Drukt op noodknop⁴⁰
7. Indien het voertuig aan het laden is, druk op de noodknop van de laadpaal (indien aanwezig) en koppel de laadstekker los⁴⁰
8. Eventuele andere handelingen om het voertuig veilig te stellen voor de specifieke bouwmaschine volgens de rescue sheet⁴⁰
9. Probeer in het geval van brand in te perken met de brandblusser nabij de machine⁴⁰
10. Neemt (minimaal) 25 meter afstand, bovenwinds.

Bedrijfsdeskundige vanuit het bouwbedrijf

1. Probeer op afstand zoveel als mogelijk informatie over het incident te verkrijgen door de waarnemer te ondervragen.
2. Lever de brandweer zoveel als mogelijk relevant geachte informatie over de machine.
 - > Lever de bij de bouwmaschine behorende rescue sheet aan bij de brandweer
 - > Informatie op, of de locatie van, het typeplaatje.

Brandweer

- > Rijd bovenwinds aan.
- > Verkrijg informatie over de situatie van het incident en de machine.

11.1.2 Herkennen

- > Mogelijk bevat de machine bestickering waaraan is te zien dat het om een elektrische bouwmaschine gaat (zie Figuur 7.3).
- > Indien de machine geen uitlaat heeft is de kans groter dat deze elektrisch is.
- > Grijs/witte rook met een typische chemie/elektriciteitsgeur, in aanvang met weinig pluimstijging geeft aanwijzing voor een thermal runaway.
- > Hoogvoltage (max 800V) battery packs en -kabels. Er kan spanning op de battery pack en het voertuig staan en er kan een vlamboog ontstaan. Kans op elektrocutie / elektrische schok is met gebruik van PBM uitgesloten.
- > Hoog voltage kabels zijn te herkennen aan de oranje kleur.
- > Kans op blijvende stroomtoevoer als het voertuig aan een laadpaal staat.

⁴⁰ Alleen indien de situatie veilig wordt geacht.

- > Houd rekening met dat de machine spontaan zou kunnen gaan rollen.

11.1.3 Verkennen

- > Persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM) en hulpmiddelen bij bestrijding:
 - o geheel gesloten, droge uitrukkleding
 - o bij rook: onafhankelijke adembescherming
 - o vluchtmasker voor een eventueel slachtoffer in de machine bij ontgassende battery pack (als dat niet mogelijk is voertuig ventileren)
 - o warmtebeeldcamera (WBC)
 - o droog isolerend gereedschap.
- > Let op! Voer bij elk stap een Laatste Minuut Risico Analyse (LMRA) uit, omdat de gevaren divers zijn en niet altijd zichtbaar of herkenbaar.
- > Voer geen enkele handeling uit aan bouwmachines betrokken bij een incident zonder geschikte persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM).
- > Achterhaal via de Rescue sheet informatie over energiebron/brandstof, voertuigconstructie, veiligheidsvoorzieningen en de-activatie van het aandrijfsysteem.
- > Raadpleeg bij twijfel over de (toxiciteit van de) situatie zo spoedig mogelijk de AGS. Deze kan tevens informatie ophalen of geven over de toxiciteit van stoffen die vrijkomen uit het batterijpakket.

Ongeval

- > Duid de betrokkenheid van de batterij. Kijk of er rook uit het batterijcompartiment komt, tezamen met warmteontwikkeling.
- > Verken op beschadigingen aan hoog voltage (oranje) kabels en het beschadigingen/vervormingen van het batterijpakket. Een instabiele batterij vormt CO (CO-meter).
- > Houd bij ernstige beschadiging van het batterijpakket één straal lage druk gereed voor het geval de batterij in thermal runaway raakt. Monitor de temperatuur van de batterij met een WBC.
- > Let op rookverschijnselen en sissende geluiden die duiden op een thermal runaway (mogelijk vanaf circa 60 °C). Gebruik de 4-gasmeter om brandbare en toxische gassen te meten.
- > Verken op lekkage van vloeistoffen zoals elektrolyt uit het batterijpakket.
- > Alle voorzorgsmaatregelen bij het optreden bij reguliere voertuigen gelden ook voor bouwmachines (airbaghoezen, scherpe voorwerpen afschermen voor het slachtoffer, etc.).

Brand

- > Wees bedacht op secundaire brandhaarden door wegschietende batterijcellen en vermijd contact met de rook als het niet noodzakelijk is voor de werkzaamheden. Blijf uit (zichtbare) gaswolken.
- > Probeer te achterhalen waar de rook vandaan komt en duid daarmee de betrokkenheid van de batterij⁴¹. Kijk of er rook uit het batterijcompartiment komt, tezamen met warmteontwikkeling, gebruik eventueel een warmtebeeldcamera. Vraag de bedrijfsdeskundige of de vrachtwagen beschikt over een op afstand uit te lezen systeem.

⁴¹ Een thermal runaway is mogelijk te herkennen aan grijs/witte rook met typische chemie/elektriciteitsgeur met in aanvang weinig pluimstijging.

- > Bij rook, maar geen warmteontwikkeling, is er niet per definitie een thermal runaway. Neemt de lithium-ion battery pack geen deel aan de brand, bestrijd de brand dan op de gewone manier. Blijf wel met een WBC de temperatuur van de battery pack monitoren met het oog op het ontstaan van een thermal runaway.

11.1.4 Stabiliseren en bestrijden

- > Ontruim zo nodig de omgeving.
- > Indien de onderstaande handelingen niet op een veilige manier verricht konden worden door de waarnemer(s), kunnen deze handelingen, of een aantal van deze handelingen (of een aantal hiervan) wel worden verricht door de brandweer met de juiste PBM's:
 1. Deactiveer het voertuig zoals aangegeven in de rescue sheet. Dit kan per merk en model bouwmaschine verschillen.
 2. Eventuele andere handelingen volgens de Rescue sheet die van belang zijn bij een incident.
 3. Indien het voertuig aan het laden is, druk op de noodknop en koppel de laadstekker los
- > Blokkeer de wielen zodat de machine niet kan gaan rollen

Ongeval

- > Draag bij ernstige deformatie van de machine uit voorzorg tegen (gering) elektrocutiegevaar droge, geheel gesloten uitrukkleding, onafhankelijke adembescherming, 1000V-handschoenen met de schacht over de mouw van de uitrukkleding, gebruik droog isolerend gereedschap. Het is niet mogelijk te meten of er spanning op het voertuig staat.
- > Dek bij ernstige deformatie van de machine uit voorzorg delen van de carrosserie waarmee het slachtoffer contact kan maken af met een rubberen mat of deken.
- > Voorzie slachtoffers in de machine - met name bij een rokende/sissende batterij- van een vluchtmasker om inademing van waterstoffluoride (HF) zo veel mogelijk te vermijden. Als dat niet mogelijk is, zorg dan voor frisse lucht voor het slachtoffer door het voertuig te ventileren (ramen openen/forceren).

Brand

- > Benader het voertuig van voren onder een hoek van 45 graden met 2 stralen lage druk en benut de volledige worplengte van de straal.
- > Gebruik geen water bij brand veroorzaakt door hydraulische olie.
- > Koeling van het batterijpakket is het effectiefst indien op celniveau kan worden gekoeld (NIPV, 2023a). Er is op dit moment nog geen methode voor handen om de thermal runaway effectief te bestrijden bij branden in bouwmachines. Het NIPV heeft succesvolle experimenten uitgevoerd met de bestrijding van batterijbranden van elektrische personenauto's met ultrahogedruk snij- en blussystemen (Hessels & Brans, 2024). Er worden voorbereidingen getroffen om de mogelijkheden voor bestrijding van branden van zwaarder elektrisch materieel zoals vrachtwagens te testen.
- > Overweeg om de machine gecontroleerd uit te laden branden.
- > Voor brandbestrijding zijn grote hoeveelheden water nodig. Er moet worden gestreefd naar het beheersen en opvangen van het wegstromende bluswater.
- > Schakel indien nodig een redvoertuig in om veilig te werken op hoogte, bijvoorbeeld aan het batterijpakket.

11.1.5 Nazorg

Brandweer

- > Draag een voertuig met een lithium-ion battery pack over aan een in elektrische voertuigen gespecialiseerde berger (bekend bij wegbeheerder en de Vereniging van Bergings- en Mobiliteitsspecialisten (VBM)). Na overdracht blijven continue temperatuurmonitoring en zo nodig koeling van belang. Het overdrachtsmoment staat niet vast, maar dient per incident te worden bepaald. Ondersteun de berger door het monitoren van het batterijpakket indien er kans is op herontsteking. Een incident met een elektrisch aangedreven bouwmaschine kan daarmee langer duren dan een incident met een conventioneel aangedreven bouwmaschine.
- > Informeer het waterschap en/of de omgevingsdienst over eventueel verontreinigd koel of bluswater en verontreinigde binnenruimtes.
- > Procedure schoon werken opstarten.

Bedrijfsdeskundige

- > Lever de berger de bij de machine behorende rescue sheet en lever zoveel als mogelijk informatie die mogelijk relevant is aan.

Bergingsbedrijf

- > Volg de instructies uit de rescue sheet op. Sommige machines hebben eisen omtrent de snelheid en afstand waarmee het voertuig versleept mag worden.
- > Gebruik geen andere verankeringspunten dan de in de rescue sheet aangegeven bevestigingspunten. Het protocol voor afslepen kan verschillen per machine.
- > Parkeer een elektrische bouwmaschine die bij een ongeval betrokken is geweest of waarvan de batterij gebrand heeft op een geschikte plaats op een veilige afstand (10 meter) van andere voertuigen, gebouwen en brandbare voorwerpen.
- > Neem afstand van sleepkabels tijdens het verslepen.
- > Maak gebruik van externe expertise (bijvoorbeeld machinefabrikant of leverancier) voor eventuele demontage van het batterijpakket (zie ook paragraaf 7.3.5).

11.2 Incidentmanagement bouwmaschine in pandig

In het voorgaande scenario is reeds een analyse van relevante richtlijnen met betrekking tot incidentmanagement nabij bouwvoertuigen gemaakt. Specifiek aanvullend voor in pandige ruimtes werden nog twee aanvullende adviezen gevonden in *Fire safety challenges with photovoltaics and Li-ion battery system installations in buildings*, namelijk in de fase Alarmeren: zorgen voor voldoende informatie van aanwezige systemen in de in pandige ruimte en in de fase Herkennen: Structurele schade (deformatie van deuren) kan duiden op explosierisico, dit vereist aangepaste brandbestrijding (analoog met een procedure gaslekkage). Ook bestaat er kans op een beschadiging van de constructie als er al eerder een explosie plaats heeft gevonden.

Voor wat betreft te nemen stappen bij dit incidentscenario kan uitgegaan worden van de adviezen die in het vorige scenario zijn opgesteld voor de brand in een elektrische bouwmaschine, zoals hieronder weergegeven en aangevuld met maatregelen specifiek voor in pandige situaties.

11.3 Incidentmanagement waterstof(aggregaat)

In deze paragraaf worden aandachtspunten opgesteld voor de incidentbestrijding bij waterstofaggregaten.

Bij een incident met waterstof zal nauwe samenwerking nodig zijn tussen de initiatiefnemer en brandweer, en eventueel andere hulpdiensten (Spoelstra & van de Ven, 2025). Aangenomen wordt dat drie verschillende personen/partijen een rol hebben in het incidentmanagement:

- > Waarnemer(s) incident: de persoon of personen die het incident waarnemen.
- > Bedrijfsdeskundige vanuit initiatiefnemer: persoon met kennis over de opstelling. Deze is op de hoogte van hoe aansluitingen losgekoppeld kunnen worden en wat meldingen van het systeem inhouden.
- > Brandweer: incidentbestrijding.

Tijdens incidenten kunnen er drie mogelijke situaties plaatsvinden:

1. Beschadigde installatie
2. Aanstraling van waterstoftank(s)
3. Waterstofbrand (fakkelbrand)

Bij het ter plaatse komen kan het zijn dat niet direct duidelijk is wat de situatie is. Daarnaast kan een situatie escaleren in een andere situatie: het aanstralen van een tank kan overgaan in het afblazen wat resulteert in een fakkelbrand. In de incidentfases alarmering, herkennen en verkennen worden algemene punten benoemd die helpen bij het identificeren van de situatie. In de fase stabiliseren en bestrijden zal voor de vier mogelijke reeds ontstane, of situaties door escalatie ontstaan handelingsperspectief worden opgesteld.

Indien de volgorde waarin handelingen worden uitgevoerd van belang zijn worden de opsommingstekens (>) vervangen door nummers.

11.3.1 Alarmeren

Waarnemer incident

1. Neemt zo spoedig mogelijk 50 meter afstand, en instrueert ook andere personen dit te doen. Hierbij wordt geen gebruik gemaakt van potentiële ontstekingsbronnen zoals telefoons en auto's.
2. Neemt contact op met de brandweer en brengt de bedrijfsdeskundige met kennis over de installatie op de hoogte.

Bedrijfsdeskundige vanuit het bouwbedrijf

1. Probeert op afstand zoveel als mogelijk informatie over het incident te verkrijgen door de waarnemer te ondervragen.
2. Levert de brandweer zoveel als mogelijk relevant geachte informatie over de installatie.

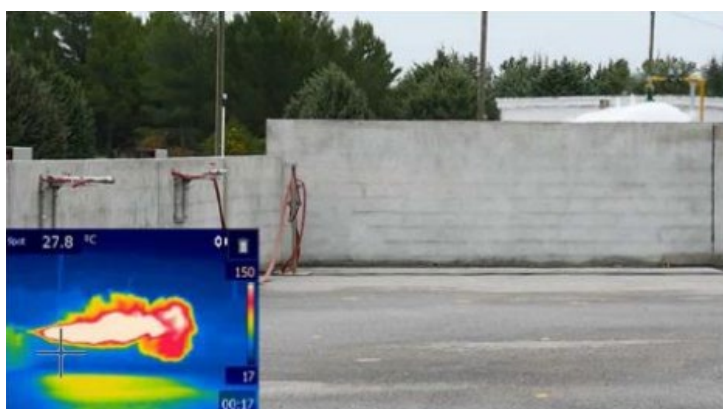
Brandweer

- > Rijd bovenwinds aan.
- > Verkrijgt informatie over de situatie van het incident en het systeem.

- > Parkeer voertuig bij aankomst op 50 meter afstand. Houd bij het opstellen van het blusvoertuig rekening met de afblaasrichting van de afblaasveiligheid (TPRD) indien deze bekend is!

11.3.2 Herkennen

- > Herken beschadigingen (deuken, breuken in isolatie of verschillende kleuren in de appendages, leidingen).
- > De schil van de tank heeft meerdere kleuren. Kleine beschadigingen zijn daarom goed te herkennen.
- > Vrijkomend gas is niet zichtbaar.
- > Houd bij besloten ruimtes rekening met kans op ophoping vrijgekomen gas, zoals bij parkeergarages, werkplaatsen, tankstations en tunnels etc. Dit veroorzaakt explosiegevaar.
- > Kenmerkend is een zeer hard en hoog geluid als gevolg van vrijkomen gas onder hoge druk (>140dB).
- > Houd rekening met openen van het veiligheidsventiel van een waterstoftank als die wordt aangestraald (dit gebeurt na 6-12 min. bij aanstraling/vlamcontact). Hierdoor ontstaat een waterstoffakkelbrand. Onder volledige aanstraling wordt aanstraling door vlamcontact of convectorie verstaan. Houd rekening met de inzet dat dit vlak na ter plaatse komen kan plaatsvinden. Bij directe aanstraling kan het ventiel eerder opengaan.
- > Bij een TPRD is er sprake van dat de hele tank leegblaast (tot atmosferische druk) na activatie: door de hoge temperatuur is ventiel gesmolten.
- > Een waterstoffakkel is extreem heet (tot 2.000°C), echter met een lage warmtestraling haaks op deze vlam naar de omgeving.
- > Een waterstofbrand geeft overdag een 'onzichtbare' vlam door een zeer schone verbranding. Zichtbaarheid van een waterstofvlam ontstaat door vlamcontact met de omgeving ('vervuiling' van vlam).
- > Met een warmtebeeldcamera is een waterstofvlam zichtbaar (zie Figuur 11.1).
- > Naast aanwezigheid van waterstof, is ook elektriciteit (hoge- en middenspanning) aanwezig. Houd daarom rekening met mogelijkheid tot gevaar voor elektrocutie.



Figuur 11.1 Zichtbaarheid waterstofvlam met WBC. (bron: Aandachtskaart H2 voertuigbrand)

11.3.3 Verkennen

- > Start de IBGS-procedure i.v.m. onbekend (groot) effectgebied (opstellijn en blijf bovenwinds)

- > Draag volledige uitrukkleding, incl. adembescherming (gebruik telefoon, portofoon, pieper alleen in veilig gebied)
- > Houd rekening met statische elektriciteit i.v.m. ontstekingsgevaar.
- > Houd standaard 25 meter afstand aan tenzij anders aangegeven bij de installatie.
- > Stel vast waar het veiligheidsventiel zit, en in welke richting deze kan afblazen. Benader deze richting onder ten minste een hoek van 45 graden.
- > Gebruik voor het detecteren van waterstof een CO-meter. Explosiegevaarmeters geven een indicatie van het explosiegevaar.
- > Gebruik een warmtebeeldcamera om een eventuele vlam zichtbaar te maken.
- > Stel vast waardoor de drukbrand wordt veroorzaakt: afblaasventiel of andere lekkage?
- > Het afblazen van tanks is extreem lawaaiig (>140dB). Hierbij kan gehoorschade ontstaan bij repressief personeel. Draag daarom uit voorzorg gehoorbescherming.

11.3.4 Stabiliseren en bestrijden

Beschadigde installatie

1. Stel de tank en de omgeving veilig.
2. Herken beschadigingen (deuken, breuken in isolatie of verschillende kleuren in de appendages, leidingen) De schil van de tank heeft meerdere kleuren. Kleine beschadigingen zijn daarom goed te herkennen. Bij dit scenario vindt vaak GEEN waterstoflekkage plaats uit de tank. Wellicht wel uit appendages aan de tank.
3. Bij een lekkage, voorkom brand / voorkom escalatie, meng gaswolken eventueel op met een (straat)waterkanon.

Aanstraling van waterstoftank(s)

1. Stel de tank en de omgeving veilig.
2. Koel een aangestraalde waterstoftank altijd met voldoende water. Houd rekening met dat een tank alsnog kan gaan afblazen, houd zoveel mogelijk afstand en denk aan de afblaasrichting. Voorkom contact van water met afblaasveiligheid, dit kan de werking ervan belemmeren!

Waterstofbrand (fakkelbrand)

1. Stel de tank en de omgeving veilig.
2. Gebruik warmtebeeldcamera om de waterstoffakkel inzichtelijk te maken.
3. Blijf bij een fakkelbrand op afstand tot de fakkel weg is. Waterstof(fakkel)-brand niet blussen, waar nodig (aangestraalde) objecten koelen.
4. Koel de omgeving om escalatie te voorkomen.

11.3.5 Nazorg

Bedrijfsdeskundige vanuit het bouwbedrijf:

- > Stem met het specialisten van de leverancier van het aggregaat af over veilige afhandeling van het incident. Deel daarbij systeemkennis van het aggregaat met de bergingsspecialist om samen acties te bedenken om weer veilig en effectief terug te keren naar een veilige situatie.
- > Zorg, samen met het specialisten van de leverancier van het aggregaat voor het veilig verwijderen van het resterende waterstofgas uit de tanks.
- > Houd rekening met resthoeveelheden waterstof in de tanks. Tanks zijn nooit helemaal leeg. Er blijft altijd 8 tot 10 bar aanwezig.

Brandweer:

- > Draag het incident over aan het bedrijf indien het gevaar geweken is en er voor de brandweer geen werkzaamheden meer zijn.
- > Waterstoftanks zijn nooit helemaal leeg, ook niet na het afblazen. Er blijft altijd 8 tot 10 bar aanwezig.
- > Zorg voor een goede overdracht aan de bedrijfsdeskundige van het bouwbedrijf.
- > Ondersteun en begeleid technische specialisten bij de afhandeling waar nodig.

12 Conclusie

Dit onderzoek richt zich op zero-emissiematerieel in de Nederlandse logistieke en bouwsector. Op basis van literatuurstudie, casusanalyse en het uitwerken van zes representatieve incidentscenario's zijn zowel veiligheidsrisico's als procedures rondom incidentbestrijding en beheersmaatregelen in kaart gebracht.

Momenteel worden in zowel de logistieke sector als de bouwsector lithium-ion batterijen het meest toegepast. Het belangrijkste veiligheidsrisico van lithium-ion batterijen is de zogeheten thermal runaway waarbij toxische en brandbare gassen vrijkomen waardoor een toxische wolk, brand of een explosie kan ontstaan. De constructie van deze batterijpakketten bemoeilijkt koeling en blussing, waardoor langdurige beschikbaarheid van bluswater en afscherming cruciaal zijn. Voor wat betreft waterstof zullen de hogedrukcilinders in voer- en werktuigen de belangrijkste veiligheidsrisico's vormen. Relevante incidentscenario's zijn een fakkelbrand, die kan ontstaan indien een waterstoftank door brand wordt aangestraald. Of een gaswolkexplosie die kan plaatsvinden indien waterstof als gevolg van een lekkage vrijkomt, zich ophoopt en vertraagd ontsteekt.

Relevante wet- en regelgeving blijkt veelal van algemene aard voor machines, voertuigen en werktuigen. Denk hierbij aan de machinerichtlijn, EMC richtlijn, Pressure Equipment Directive, ATEX regelgeving, ADR en de kaderverordening. Onder Nederlandse wetgeving vallen de omgevingswet en bijbehorende Besluiten, arbowetgeving, de warenwet, wet vervoer en gevaarlijke stoffen, typegoedkeuring voertuigen en laadpleinen. Daarnaast bestaan er afzonderlijke normen en richtlijnen met betrekking tot lithium-ion batterijen en waterstof, waaronder NEN-normen, NFPA-standaarden en de Publicatiereeksen Gevaarlijke Stoffen. De bestaande wet- en regelgeving is echter vaak (nog) niet toegesneden op de specifieke combinatie van nieuwe energievormen, materieel in een logistieke of bouwomgeving.

In de praktijk wordt in beide sectoren meerdere soorten zero-emissiematerieel ingezet en ontwikkeld. In de logistiek gaat het met name om elektrische vrachtwagens, trekkers, bestelauto's en interne transportmiddelen (zoals heftrucks en reachtrucks). In de bouwsector betreft het een groeiend scala aan elektrische graafmachines, shovels, trilplaten, hoogwerkers, mobiele energieopslagsystemen (EOS'en) en waterstofaggregaten.

Uit de analyse van reeds bestaande ongevallencasuïstiek blijkt dat alternatieve brandbestrijdingsmethoden – zoals het gericht inbrengen van water in batterijpakketten of het demonteren van componenten – in sommige situaties effectief kunnen zijn. In de praktijk zijn dergelijke methoden echter niet altijd toepasbaar, zeker bij zero-emissiematerieel of voertuigen zonder toegankelijke of demonteerbare batterijpakketten. Daarnaast zijn uit deze casussen operationele leerpunten afgeleid, zoals het belang van directe toegang tot grote hoeveelheden bluswater, het beschikbaar hebben van contactpersonen met technische kennis op locatie, en het instrueren van personeel in de omgeving over hoe te handelen bij incidenten. Ook is het essentieel dat sleutels van zero-emissievoertuigen beschikbaar zijn voor hulpdiensten om snelle verplaatsing ervan mogelijk te maken.

De zes uitgewerkte incidentscenario's laten zien dat warmtestraling, toxische rook en explosie de mogelijke effecten zijn bij incidenten met zero-emissiematerieel. De reikwijdte van deze effecten varieert per situatie. Locatie, energiedichtheid en omgeving bepalen in sterke mate welke maatregelen nodig zijn. In de logistieke sector concentreren laadactiviteiten zich vaak op depots, wat de risico's bij incidenten vergroot, zeker wanneer voertuigen dicht op elkaar staan. In de bouw komt daar de extra complexiteit bij van dynamische werkomgevingen, met ad-hoc geplaatste laadpunten, mobiele energiesystemen en beperkte controle op afstand tot kwetsbare objecten.

Referentielijst

- Anderson, J., Willstrand, O., & Temple, A. (2025). *Design rules for battery fire safety in dwellings*.
- Arbo Inspectie. (2008). *Gerichte inspecties in uw branche*.
- Arcadis. (2023). *Veiligheid rondom emissieloos materieel in de bouw en bouwtransport* Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
<https://open.overheid.nl/documenten/9b224478-3d6d-4dda-9035-ddf1744551b0/file>
- BAM. (2022). *Eerste bouwmaschine met waterstofverbrandingsmotor*.
<https://www.baminfra.nl/nieuws/2022/9/eerste-bouwmaschine-met-waterstofverbrandingsmotor>
- Bergstrand, D. (2024). *7 veelvoorkomende vragen over vrachtwagens op waterstof | Volvo Trucks*. <https://www.volvotrucks.nl/nl-nl/news/kennisbank/uitstoot-verminderen/7-common-questions-about-hydrogen-trucks.html>
- Bouwen op waterstof. (z.d.). *Bouwen op Waterstof - Over ons*.
<https://www.bouwenopwaterstof.nl/over-ons/>
- Bouwen op Waterstof. (2025). *Gesprek met kennisplatform Bouwen op Waterstof*.
[bouwenopwaterstof.nl](https://www.bouwenopwaterstof.nl)
- Brandweer Amsterdam-Amstelland. (2016). *Handreiking voor optreden tijdens incidenten met waterstoftoepassingen*.
- Brandweer Nederland. (2019a). *Aandachtskaart bestrijding incidenten H2 Brandstoftanks*.
- Brandweer Nederland. (2019b). *Aandachtskaart Bestrijding incidenten voertuigbrand met H2*.
- Brandweer Nederland. (2019c). *Aandachtskaart waterstof (drukhouder, gasvormig)*.
<https://archief.nipv.nl/wp-content/uploads/sites/2/2022/03/20190628-BRWNL-Aandachtskaart-H2-Algemene-procedure.pdf>
- Brandweer Nederland. (2021). *Aandachtskaart Lithium-ion energiedragers*.
- Brandweer Nederland. (2023). *Naslagwerk (H)OvD en AGS Elektrisch aangedreven voertuigen*.
- Brandweeracademie. (2020). *Bestrijding incident e-voertuig (hybride of elektrisch voertuig)*.
- Brans, H. (2023a). *Li-ion thuisbatterij*. https://scenarioboeken.nipv.nl/li-ion-thuisbatterij-in-woning/?_gl=1*gzqm78*_gcl_au*MTEzOTAzNzQzOS4xNzQ1ODI5ODI4
- Brans, H. (2023b). *Verkenning toekomstige batterijtypen en veiligheid*. NIPV.
<https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/10/20230712-NIPV-Verkenning-toekomstige-batterijtypen-en-veiligheid.pdf>
- Brans, H., & Reinders, J. (2024). *Model voor het berekenen van de warmtestraling van elektrische voertuigbranden*. NIPV. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2024/06/20240426-NIPV-Model-berekenen-warmtestraling-elektrische-voertuigbranden.pdf>
- CE Delft. (2023). *Zero-emissiebouwplaats Inrichting en meerkosten*. https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2023/07/CE_Delft_220269_Publicatie_Zero_Emissie_Bouwplaats_def.pdf
- Chen, Y., Kang, Y., Zhao, Y., Wang, L., Liu, J., Li, Y., Liang, Z., He, X., Li, X., Tavajohi, N., & Li, B. (2021). A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. *Journal of Energy Chemistry*, 59, 83–99.
<https://doi.org/10.1016/J.JECHEM.2020.10.017>
- CROW. (2022a). *Inventarisatie veiligheidsaspecten zero-emissiebussen*.
<https://www.crow.nl/kennisproducten/inventarisatie-van-veiligheidsaspecten-zero-emissiebussen/>
- CROW. (2022b). *Ontwerprichtlijnen brandveiligheid stallingen voor zero-emissiebussen*.
<https://www.crow.nl/kennisproducten/ontwerprichtlijnen-brandveiligheid-stallingen-voor-zero-emissiebussen/>
- CROW. (2023). *Invloed zero-emissiebussen op brand- en explosieveiligheid van ov-*

- knooppunten. <https://www.crow.nl/kennisproducten/rapport-invloed-zero-emissiebussen-op-brand-en-explosieveilgheid-van-ov-knooppunten/>
- DNV. (2022). *Veiligheid elektrisch rijden en laden in logistiek en bouw*. <https://www.dnv.nl/publicaties/veiligheid-elektrisch-rijden-en-laden-in-logistiek-en-bouw-219308/>
- Drivetozero. (z.d.). *Zero-Emission Technology Inventory (ZETI)*. Geraadpleegd 12 mei 2025, van <https://globaldrivetozero.org/tools/zeti/>
- ELaadNL. (2025). *ELaadNL Outlook Logistiek Update 2025 en ELaadNL Outlook Bouw Update 2024*. <https://elaad.nl/projecten/elaadnl-outlooks/>
- Euralarm. (2022). *Guidance on Integrated fire protection solutions for Lithium-Ion batteries.pdf*. <https://www.euralarm.org/resource/guidance-li-ion-battery-protection-pdf.html>
- Europese Commissie. (z.d.). *Types of EU law - European Commission*. Geraadpleegd 12 mei 2025, van https://commission.europa.eu/law/law-making-process/types-eu-law_en
- Fuel Cells Works. (2022). *Do Fuel Cells Carry Any Danger for Human Health?* <https://fuelcellsworks.com/news/do-fuel-cells-carry-any-danger-for-human-health>
- GIANT. (z.d.). *G2200E COMPACT, KRACHTIG, 100% ELEKTRISCH*. https://configurator.tobroco-giant.com/files/Machines/G2200E/giant_g2200e_nl_online.pdf
- Heilweil, R., & Rodgers, E. (VOX). (2022). *How to build a better battery*. <https://www.vox.com/recode/23027110/solid-state-lithium-battery-tesla-gm-ford>
- Hessels, T., & Geertsema, T. (2023). *Onderzoek dompelcontainers*. NIPV. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/03/20230206-NIPV-Onderzoek-dompelcontainers.pdf>
- Huiyao-Laser. (2022). *Types of Lithium Batteries*. <https://www.hylasermachine.com/news-battery-welding.html>
- HVI. (2024). *Wheel Loader Safety: A Comprehensive Guide for Construction Professionals*. <https://heavyvehicleinspection.com/checklist/post/Wheel-Loader-Safety-Checklist>
- Ingason, H., & Lönnemark, A. (2005). Heat release rates from heavy goods vehicle trailer fires in tunnels. *Fire Safety Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.06.002>
- Ingason, H., Lönnemark, A., Frantzich, H., & Kumm, M. (2010). *Fire incidents during construction work of tunnels*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962588/FULLTEXT01.pdf>
- Inspectie Leefomgeving en Transport. (z.d.). *Vervoerbare drukapparatuur (TPED)*. Geraadpleegd 12 mei 2025, van <https://www.ilent.nl/onderwerpen/vervoerbare-drukapparatuur-tped>
- Instituut Fysieke Veiligheid. (2020). *Veiligheidsaspecten van het laadproces van elektrische bussen in de openbare ruimte in de IJssel-Vecht concessie* (Nummer april).
- Interreg. (2024). *Mierenzuur voor duurzame energieopslag*. <https://interregvland.eu/nieuws/mierenzuur-voor-duurzame-energieopslag>
- JCB. (2024). *Waterstof*. <https://www.jcb.com/nl-nl/campaigns/hydrogen>
- Kloosterman, J., & Jansen, B. (2024). *Gesprek SMT Emmeloord*.
- KNAC. (2021). *Bosch werkt aan waterstofverbrandingsmotor - KNAC - de club van en voor autoliefhebbers*. <https://www.knac.nl/bosch-werkt-aan-waterstofverbrandingsmotor/>
- Kong, D., Lv, H., Ping, P., & Wang, G. (2023). A review of early warning methods of thermal runaway of lithium ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 64, 107073. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.107073>
- Lokhande. (2024). *Why BYD, Tesla and CATL move towards the LFP battery technology*. | *LinkedIn*. <https://www.linkedin.com/pulse/why-byd-tesla-catl-move-towards-lfp-battery-ashish-lokhande-0jrhf/>
- Maks, S. (2024). *Binnenkort rijden er waterstoftrucks van MAN over de Maasvlakte | Change Inc*. <https://www.change.inc/mobiliteit/binnenkort-rijden-er-waterstoftrucks-van-man-over-de-maasvlakte-40916>
- Manitou. (z.d.). *Manitou MRT 2660 e*. <https://www.manitou.com/nl-NL/onze-machines/roterende-verreikers/mrt-2660-e>
- Mylenbusch, I. S., Claffey, K., & Chu, B. N. (2023). Hazards of lithium-ion battery energy storage systems (BESS), mitigation strategies, minimum requirements, and best practices. *Process Safety Progress*, 42(4), 664–673. <https://doi.org/10.1002/PRS.12491>; JOURNAL: JOURNAL: 15494632; WEBSITE: WEBSI

TE:AICHE;WGROU:STRING:PUBLICATION

- Nachtergaele, R. (2022). *Presentatie brand elektrische bus Roeselare*.
- NAL. (2022). *Handreiking depotladen - Een praktische handreiking voor laadinfrastructuur voor elektrische vrachtwagens*. <https://topsectorlogistiek.nl/wp-content/uploads/2023/09/OVL90.00.014-NAL-Logistiek-Handreiking-Depot-Laden.pdf>
- Nationale Agenda Laadinfrastructuur. (z.d.). *Laadkaart zwaar vervoer | Nationale Agenda Laadinfrastructuur*. Geraadpleegd 12 mei 2025, van <https://www.agendalaadinfrastructuur.nl/monitoring+2021/dashboards/laadkaart+zwaar+vervoer/default.aspx>
- Natuur & Milieu (2025). *Elektrische en Mobiele Werktuigen in Beeld*. (<https://natuurenmilieu.nl/app/uploads/Elektrische-mobiele-werktuigen-in-beeld.pdf>)
- NEN. (2020). *NEN-EN-IEC 62282*.
- NEN. (2024). *Machineveiligheid & Machinerichtlijn*. <https://www.nen.nl/machines-procesindustrie/machineveiligheid>
- NIPV. (2024a). *Mierenzuuraggregaat – Toxische wolk - Scenarioboeken*. <https://scenarioboeken.nipv.nl/mierenzuuraggregaat-toxische-wolk-2/>
- NIPV. (2024b). *Verslag Community of Practice waterstof(dragers) 28 maart 2024*. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2024/04/20240429-NIPV-Verslag-Community-of-Practice-waterstofdragers-28-maart-2024.pdf>
- NKL. (2020). *Handreiking laden van elektrische voertuigen in de logistieke sector*. <https://nkl.nl/nederland.nl/wp-content/uploads/2020/10/Handreiking-Logistiek-Laden-DEF.pdf>
- PV-E Crane BV. (2021). *Electric Crawler Crane Model EC80*. <https://pv-ecrane.com/wp-content/uploads/2021/11/PV-E-Crane-EC80.pdf>
- RDW. (z.d.). *Voertuigcategorieën*. Geraadpleegd 12 mei 2025, van <https://www.rdw.nl/particulier/paginas/voertuigcategorieen>
- Reinders, J., Barreveld, A., & Riemersma, B. (2024). *Veiligheidseisen voor EV-laadpleinen bij transportondernemingen*. NIPV. <https://nipv.nl/nieuws/brandveiligheidseisen-voor-laadpleinen-met-elektrische-voertuigen-bij-transportondernemingen/>
- Reinders, J., & Brans, H. (2023). *Veiligheid alternatief aangedreven voertuigen op chemische sites*. NIPV. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/06/20230605-NIPV-Veiligheid-alternatief-aangedreven-voertuigen-op-chemische-sites-fase-2.pdf>
- Renault trucks. (2023). *RENAULT TRUCK E-TECH D / E-TECH D WIDE*.
- Rijksoverheid. (z.d.). *Regels voor bouwvoertuigen en landbouwvoertuigen*. Geraadpleegd 12 mei 2025, van <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/voertuigen-op-de-weg/andere-voertuigen/bouwvoertuigen-en-landbouwvoertuigen>
- Rijksoverheid. (2023). *Transitiepaden | Op weg naar klimaatneutrale en circulaire uitvoering | Duurzaamheidsverslag*. <https://magazines.rijksoverheid.nl/ienw/duurzaamheidsverslag/2023/01/transitiepaden>
- Rijkswaterstaat. (z.d.). *A1: uitbreiding Apeldoorn-Azelo*. <https://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/projectenoverzicht/uitbreiding-a1-oost>
- Rijkswaterstaat. (2024). *Al bijna 50 stuks groot elektrisch materieel ingezet bij de verbreding van de A1*. <https://www.a1oost.nl/duurzaam+verbreden+a1/emissieloos/2638172.aspx>
- RIVM. (2021). *Interventiewaarden voor incidentbestrijding: interventiewaarden, stofdocumenten en handleiding*. https://rvs.rivm.nl/sites/default/files/2021-12/Handleiding_en_Stofdocumenten_Interventiewaarden_2021.pdf
- ROGER Energy. (2024). *Presentatie ROGER Energy CoP Waterstof(dragers) - Toepassing en tijdelijke inzet van waterstof gedreven equipment*.
- Sanfeliu Meliá, C., Stølen, R., & Garberg Olsø, B. (2024). Fire safety challenges with photovoltaics and Li-ion battery system installations in buildings. *Journal of Physics: Conference Series*, 2885(1), 012110. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2885/1/012110>
- Scania. (z.d.). *Batterij elektrische trucks*. Geraadpleegd 12 mei 2025, van <https://www.scania.com/nl/nl/home/products/trucks/battery-electric-truck.html>
- Scania. (2025). *Scania 6x2 CR20H BEV Electric*.
- Schröder, R., Aydemir, M., & Seliger, G. (2017). Comparatively Assessing different Shapes of Lithium-ion Battery Cells. *Procedia Manufacturing*, 8, 104–111. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2017.02.013>
- SEB. (2024). *Routekaart Schoon en Emissieloos Bouwen*.

- <https://www.opwegnaarseb.nl/documenten/2024/11/04/routekaart-seb>
- Spoelstra, M. (2021). *Waterstofauto's in parkeergarages*. IFV. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2022/07/20210209-IFV-Waterstofautos-in-parkeergarages.pdf>
- Spoelstra, M., & van de Ven, F. (2025). *Handreiking veilige leefomgeving: waterstofaggregaten*. <https://nlhydrogen.nl/wp-content/uploads/2023/12/WP2-Handreiking-veilige-leefomgeving-waterstofaggregaten.pdf>
- Sun, P., Bisschop, R., Niu, H., & Huang, X. (2020). A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. In *Fire Technology* (Vol. 56, Nummer 4). <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>
- SWOV. (2020). *Vracht- en bestelauto's*. SWOV. <https://swov.nl/nl/factsheet/vracht-en-bestelautos>
- Takenaka, N., Bouibes, A., Yamada, Y., Nagaoka, M., & Yamada, A. (2021). Frontiers in Theoretical Analysis of Solid Electrolyte Interphase Formation Mechanism. *Advanced Materials*, 33(37), 1–15. <https://doi.org/10.1002/adma.202100574>
- TNO. (2022). *TNO's zware waterstofmotor wint tweede prijs EARTO award*. <https://www.tno.nl/nl/newsroom/2022/10/zware-waterstofverbrandingsmotor-earto/>
- van der Spek. (2023). *HX260AL Electric*. <https://vanderspek.nl/wp-content/uploads/2024/02/HX260-Elektrische-Hyundai-2023.pdf>
- van Harn, T., Brans, H., & Reinders, J. (2024). *Explosieveiligheid lithium-ion energieopslagsystemen*. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2025/01/20241120-NIPV-Explosieveiligheid-lithium-ion-energieopslagsystemen.pdf>
- van Harn, T., & Hessels, T. (2024). *Incidentmanagement zero-emissiebussen*. NIPV. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2024/08/20240723-NIPV-Incidentmanagement-ZE-bussen.pdf>
- van Harn, T., & Reinders, J. (2025). *Batterijmanagementsysteem en thermal runaway*. NIPV. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2025/04/20250424-NIPV-Batterijmanagementsysteem-en-thermal-runaway.pdf>
- Veiligheidsregio Noord- en Oost-Gelderland. (2022). *Rapport Brandonderzoek Waterstofbus Doetinchem*.
- Virta. (z.d.). *JOUW PLATFORM VOOR EEN WINSTGEVENDE EV-LAADBUSINESS*. <https://www.virta.global/blog/electrification-of-heavy-duty-fleets-the-time-is-right>
- VNG. (z.d.). *Duurzame grond-, weg- en waterbouw*. Geraadpleegd 12 mei 2025, van <https://vng.nl/artikelen/duurzame-grond-weg-en-waterbouw>
- Volvo. (2024). *Volvo Trucks – Inside the new revolutionary heavy-duty electric driveline*. <https://www.youtube.com/watch?v=JLS9wFr6xaQ>
- VOLVO. (z.d.). *VOLVO WHEEL LOADERS Environmental Declaration*.
- VOLVO. (2022). *VOLVO TRUCKS FH/FM/FMX ELEKTRISCH (TREKKER) Rescue*.
- Volvo Buses. (2022). *Rescue Sheet Autobus Volvo 7900 Electric*.
- Volvo Trucks. (z.d.). *Demo FH Aero Electric*. <https://driverguide.volvotrucks.com/lang/nl/chassi/AA00FHAE/home>
- VRBZO. (2022). *Brandbestrijding accupakket elektrische bezorgauto Picnic*. https://www.youtube.com/watch?v=5_4hSAw2MYo
- VRU. (2023). *Afbeeldingen verkregen via de Veiligheidsregio Utrecht*.
- Waterstofguide. (2023). *Waterstof verbrandingsmotor: werking, eigenschappen en toekomst - Waterstofguide*. <https://waterstofguide.nl/waterstof-verbrandingsmotor>
- Willstrand, O., Bisschop, R., Temple, A., & Anderson, J. (2020). *Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles, RISE Report*.
- Zhi, M., Liu, Q., Xu, Q., Pan, Z., Sun, Q., Su, B., Zhao, H., Cui, H., & He, Y. (2024). Review of prevention and mitigation technologies for thermal runaway in lithium-ion batteries. *Aerospace Traffic and Safety*, 1(1), 55–72. <https://doi.org/10.1016/J.AETS.2024.06.002>

Bijlage 1: Toelichting aanvullende informatiebronnen maatregelen logistiek

Voor het opstellen van de veiligheidsmaatregelen is onder meer gebruik gemaakt van onderstaande documentatie:

- > *Scania 6x2 CR20H BEV Electric* (Scania, 2025)
Rescue sheet behorend bij een vrachtwagentrekker categorie N3.
- > *Volvo Trucks FH/FM/FMX Elektrisch (Trekker)* (VOLVO, 2022)
Rescue sheet behorend bij een vrachtwagentrekker categorie N3.
- > *Renault Trucks e-tech D / e-tech D wide* (Renault trucks, 2023)
Rescue sheet behorend bij een vrachtwagentrekker categorie N3.
- > *DEMO FH Aero Electric* (Volvo Trucks, z.d.)
Handleiding behorend bij een vrachtwagentrekker uit de categorie N3.
- > *Veiligheid alternatief aangedreven voertuigen op chemische sites* (Reinders & Brans, 2023).
Het NIPV heeft in 2023 reeds een studie uitgevoerd naar het scenario waarin een elektrische vrachtwagen op een chemische site in thermal runaway raakt
- > *Veiligheidseisen voor EV-laadpleinen bij transportondernemingen* (Reinders et al., 2024)
Beschrijft veiligheidsmaatregelen en richtlijnen voor het brandveilig inrichten en beheren van laadpleinen voor elektrische voertuigen bij transportondernemingen, met speciale aandacht voor risicoanalyse, incidentbestrijding en wet- en regelgeving.
- > *Handreiking depotladen – Een praktische checklist voor laadinfrastructuur voor elektrische vrachtwagens.* (NAL, 2022)
De handreiking biedt praktische ondersteuning aan transportbedrijven bij het verduurzamen van hun vrachtwagenvloot door middel van elektrisch laden op een depot

Bijlage 2: Toelichting aanvullende informatiebronnen maatregelen bouw

- > [VOLVO Electric Wheel loader L120 Electric Rescue Sheet](#)
Rescue sheet met informatie over VOLVO L120 elektrische wiellader.
- > [CASE 12EV Rescue Sheet](#)
Rescue sheet met informatie over CASE 12EV elektrische wiellader.
- > [Instructieboek L110H, L120H](#)
Instructieboek behorend bij Volvo wielladers dat informatie bevat over o.a. brandveiligheid, bergen en slepen.
- > *Gesprek leverancier elektrische bouwmaschinen*
Gesprek met SMT Emmeloord.
- > *Inventarisatie veiligheidsaspecten zero-emissiebussen (CROW, 2022a).*
Studie van CE-Delft naar de veiligheidsaspecten van zero-emissiebussen in Nederland. Dit rapport bespreekt enkele rapportages die ook in dit onderzoek worden besproken; daarom is overlappende informatie weggelaten.
- > *Presentatie brand elektrische bus Roeselare (Nachtergaele, 2022).*
Presentatie over het incidentverloop van een brand in een elektrische bus in Roeselare, België.
- > *Veiligheidsaspecten van het laadproces van elektrische bussen in de openbare ruimte in de IJssel-Vecht concessie (Instituut Fysieke Veiligheid, 2020).*
Onderzoeksrapport naar het borgen van de veiligheid van reizigers tijdens een calamiteit tijdens het laadproces en het richting geven aan een calamiteitenbestrijdingsprotocol.
- > *Rescue sheet Autobus Volvo 7900 Electric (Volvo Buses, 2022).*
Rescue sheet met informatie over elektrische Volvo bus 7900 electric.
- > *Fire safety challenges with photovoltaics and Li-ion battery system installations in buildings (Sanfeliu Meliá et al., 2024).*
Artikel over brandveiligheidsrisico's van zonnepanelen en lithium-ion batterijen in gebouwen en hoe deze risico's beter begrepen en gereguleerd kunnen worden.
- > *Design rules for battery fire safety in dwellings (Anderson et al., 2025).*
Rapportage die ontwerprichtlijnen en aanbevelingen voor het veilig opladen, opslaan en omgaan met lithium-ionbatterijen (zoals van e-bikes en e-scooters) in woningen. Wellicht kunnen hier ook relevante leerpunten uit worden verkregen voor het gebruik van in pandige elektrische bouwmaschinen.
- > *Aandachtskaart waterstof (drukhouder, gasvormig) (Brandweer Nederland, 2019c)*
Deze aandachtskaart geeft een handelingsperspectief voor het optreden bij incidenten met waterstofdrukhouders.

- > *Aandachtskaart Bestrijding incidenten voertuigbrand met H2* (Brandweer Nederland, 2019b)
Deze aandachtskaart geeft een handelingsperspectief voor het optreden bij incidenten met een waterstofvoertuig.
- > *Aandachtskaart Bestrijding incidenten H2 brandstoftanks* (Brandweer Nederland, 2019a)
Deze aandachtskaart geeft een handelingsperspectief voor het optreden bij incidenten met waterstofbrandstoftanks.
- > *Incidentmanagement zero-emissiebusen* (van Harn & Hessels, 2024)
Een rapportage waarin handelingsperspectief voor zero-emissiebusen wordt omschreven. De rapportage bevat informatie over veiligheidsmaatregelen rondom waterstoftanks.
- > *Handreiking veilige leefomgeving: waterstofaggregaten* (Spoelstra & van de Ven, 2025)
Dit rapport biedt inzicht in de wet- en regelgeving, risico's en mogelijke maatregelen met betrekking tot waterstofaggregaten.
- > *NEN-EN-IEC 62282* (NEN, 2020)
Een internationale normreeks die technische en veiligheidseisen beschrijft voor brandstofcellen, waaronder systemen die werken op waterstof.
- > *Rapport Brandonderzoek Waterstofbus Doetinchem* (Veiligheidsregio Noord- en Oost-Gelderland, 2022)
Onderzoeksrapport naar een brand in een waterstofbus in een remise in Doetinchem. Deze rapportage bevat informatie over een incident waarbij waterstof betrokken was.

Bijlage 3: Betrokken organisaties

Naam	Organisatie
Rob Aarse	Transport en Logistiek Nederland
Rob van Amerongen	Vereniging van Bergings- en Mobiliteitsspecialisten
Jasper van den Bosch	Stedin
Paul Broos	ElaadNL
Alma Butter	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Sipke Castelein	Rijksdienst voor Ondernemend Nederland Nationale Agenda Laadinfrastructuur
Ron Christiaanse	Verbond van Verzekeraars
Stefan Daamen	Emmissieloos Netwerk Infra
Sander Jansen	Transport en Logistiek Nederland
Dick van de Laar	Bouwend Nederland
Ruud Pennings	Rijksdienst voor Ondernemend Nederland Nationale Agenda Laadinfrastructuur
Marco Ubeda	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Roy Ummenthum	Brandweer Nederland
Rik Vorgers	Vereniging van Bergings- en Mobiliteitsspecialisten
Johan de Vries	Brandweer Nederland
Julia Williams	Hytruck Consult & Partners Coöperatie