

Förstudie: Branddynamik batteridrivna gruvfordon

Publik rapport



Författare: Jonas Brandt
Datum: 2022-05-03
Projekt inom Fossilfria mobila arbetsmaskiner

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English.....	3
3 Bakgrund.....	4
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	5
5 Mål	5
6 Resultat och måluppfyllelse	6
7 Spridning och publicering	7
7.1 Kunskaps- och resultatspridning.....	7
7.2 Publikationer	7
8 Slutsatser och fortsatt forskning	7
9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....	8
Bilaga 1 – White paper	8

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

Det sker inom gruvindustrin, såväl som i samhället i övrigt, en pågående och inom snart framtid betydande omställning från fordon med förbränningsmotor till fordon med nya energibärare. För att denna omställning ska kunna utföras behöver de nya risker som uppstår identifieras och hanteras. Det övergripande syftet med denna förstudie har varit att sammanställa kunskapsläget avseende brandrisker med batterielektriska fordon, identifiera kunskapsluckor och definiera det framtida behovet av fortsatt forskning för att ge svar på de frågor och osäkerheter som idag råder kring införandet av batteridrivna gruvfordon.

Statistik visar att över hälften av de bränder som inträffat i Svenska gruvor är relaterade till fordon. Kunskapen gällande bränders utveckling i fossildrivna fordon är god och har i relativt stor omfattning omsatts till de förhållanden som råder i undermarksmiljöer. Vid omställning till fordon med nya energibärare behöver hänsyn tas till andra förutsättningar och risker. Denna förstudie påvisar ett kunskapsgap som bör överbryggas genom fortsatt forskning och utveckling. Till detta hör bland annat att undersöka i vilken utsträckning aktiva och passiva säkerhetssystem kostnadseffektivt kan minska sannolikheten för och mildra konsekvenserna av en brand i ett batterielektriskt gruvfordon. Behovet av fortsatt utveckling omfattar dock inte enbart tekniska lösningar relaterade till fordonens batterisystem. Forskningsbehovet inkluderar i hög grad även organisatoriska frågor kring räddningsinsatser och beredskapsplanering för underjordsgruvor. En nyckelfaktor för att framgångsrikt kunna hantera risker är förberedelser och planering innan en incident inträffar. Förberedelser och vidtagna åtgärder bör involvera såväl gruvbolagen som räddningstjänster och fordonstillverkare. Till följd av den potentiella komplexiteten vid en brand i ett batteridrivna gruvfordon en underjordsgruva är det viktigt att det förebyggande arbetet samordnas såväl fordonstekniskt som organisatoriskt.

2 Executive summary in English

The mining industry, as other industries around the world, is facing a major restructuring to meet the environmental goals. As a part of the change, the industry is moving away from fossil-fueled vehicles and moving towards an increased use of battery-electric vehicles. A challenge in underground mines is the environment in which the vehicles operate and the heavy strain on the vehicles but also the fact that accidents underground can be difficult to handle and have major consequences. A rescue operation in underground facilities places great demands on emergency planning and on knowledge on how fires develop in the current environment and may require extensive resources. In the event of fires in underground mines, the response route is often long, and the time before the actual extinguishing operation can begin may be extended.

Statistics on fire incidents in Swedish mines show that more than half of the fires that have occurred are related to vehicles. The knowledge regarding the development of fires in vehicles with combustion engines is well established and has to a relatively large extent been translated into the conditions prevailing in underground environments. When converting to vehicles with new energy carriers, other conditions and risks need to be considered in safety assessments and action planning. The majority of the new energy carriers used within the mining industry are battery-electric vehicles powered by lithium-ion batteries and hence the pre-study has focused on the differences between fires in these vehicles and in vehicles with conventional fuels.

This pre-study identifies a knowledge gap that should be bridged through continued research and development. This includes investigating the extent to which active and passive safety systems can cost-effectively reduce the probability of and mitigate the consequences of a fire in a battery-electric mining vehicle. However, the need for further development does not only include technical solutions related to the vehicles' battery systems. The need for research, to a

large extent, also includes organizational issues concerning rescue efforts and emergency preparedness planning for underground mines. A key factor in successfully managing risks is preparation and planning before an incident occurs. Preparations and countermeasures should involve the mining companies as well as rescue services and vehicle manufacturers. Due to the complexity of a battery electric vehicle fire in an underground mine, it is important that the preventive work is coordinated both technically and organizationally

3 Bakgrund

Gruvindustrin, liksom övrig industri världen över, står inför en stor omställning för att klara ställda miljömål. Svensk gruvnäring ligger inom många områden i teknikens framkant och försök med den elektrifierade gruvan och batteridrivna fordon pågår redan. För att lyckas uppnå Sveriges miljömål¹ att senast år 2045 inte ha nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären, behöver såväl transportsektorn som industrin frångå fossildrivna fordonslösningar. Gruvindustrin står idag för ca 8 % av Sveriges koldioxidutsläpp², varav ca 2 % härrör från användning av fossila bränslen. Intresset och ambitionen att elektrifiera gruvdriften i Sverige är stor, men kunskapsunderlaget avseende batteribränder, brandskydd och brandsäkerhet i tunga elfordon är fortfarande begränsat. En utmaning inom gruvindustrin är dels miljön i vilken arbetsfordonen verkar och den hårda belastningen på fordonen, dels det faktum att olyckor under mark kan vara svåra att hantera och få stora konsekvenser. En räddningsinsats i anläggningar under mark ställer stora krav på insatsplanering, kunskap om hur bränder utvecklas i den aktuella miljön och kan ta stora resurser i anspråk. Vid bränder i gruvor är insatsvägen ofta lång och det kan ta flera timmar innan den reella släckinsatsen kan påbörjas. I vissa fall kan det också, ur miljösynpunkt eller med hänsyn till räddningsmanskapers säkerhet, vara ett bättre alternativ att låta brandobjektet brinna ut i stället för att genomföra en aktiv släckinsats.

Statistik över bränder och brandtillbud i svenska gruvor³ visar att över hälften av de inträffade bränderna är relaterade till fordon. Kunskapen gällande bränders utveckling i fossildrivna fordon är god och har i relativt stor omfattning omsatts till de förhållanden som råder i undermarksmiljöer. Vid omställning till fordon med nya energibärare behöver hänsyn tas till andra förutsättningar och risker vid säkerhetsbedömningar och insatsplanering.

Huvuddelen av dagens och morgondagens batteridrivna fordon drivs av litiumjonbatterier. De huvudsakliga riskerna med litiumjonbatterier är termisk rusning, utsläpp av farliga gaser och risken att batteriet återantänder efter släckning⁴. Termisk rusning kan uppstå om batteriet blir utsatt exempelvis för extern värmepåverkan eller mekanisk påverkan. Vid termisk rusning finns risk för att batteriets elektrolyt frigörs, förångas och producerar toxiska gaser, exempelvis väteklorid, cyanväte och vätefluorid. Vid ofullständig förbränning finns också risk för att större mängder explosiv gas frigörs och utgör en risk för räddningstjänstens personal. Erfarenheten av och kunskapen om hur branden utvecklas och sprids i tyngre batteridrivna arbetsfordon och hur en brand i fordonets övriga delar påverkar litiumjonbatteriet är ännu begränsad.

Vid en brand i gruva sker utrymning i många fall till räddningskammare som finns utplacerade i närheten av gruvpersonalens arbetsställen. De krav som ställs på en räddningskammarens luftförsörjning är baserade på erfarenhet från och brandförsök med traditionella fossildrivna

¹ Regeringens klimatpolitiska ramverk, <https://www.regeringen.se/artiklar/2017/06/det-klimatpolitiska-ramverket/>

² Färdplan för en konkurrenskraftig och fossilfri gruv- och mineralnäring, https://www.svemin.se/?file_download&file=4227

³ Bränder och brandtillbud 2016, https://www.svemin.se/?file_download&file=2397

⁴ Vägledning, räddningsinsats där litiumjonbatterier förekommer, <https://rib.msb.se/filer/pdf/29268.pdf>

arbetsfordon. Det är i dagsläget inte klarlagt om den föreskrivna tiden för erforderlig luftförsörjning i räddningskammare är tillräcklig vid bränder i större batteridrivna arbetsfordon. För att kunna planera såväl det förebyggande brandskyddsarbetet, genomföra erforderliga riskanalyser och insatsplanering krävs därför ytterligare studier.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Det övergripande syftet med förstudien har varit att sammanställa kunskapsläget avseende brandrisker med batterielektriska fordon, identifiera kunskapsluckor och definiera det framtida behovet av fortsatt forskning för att ge svar på de frågor och osäkerheter som idag råder kring införandet av batteridrivna arbetsfordon.

Inriktningen på förstudien har utgått ifrån på ett tidigare genomfört seminarium med representanter från såväl nationell som internationell gruvindustri. Vid seminariet diskuterades vilka frågeställningar avseende brandsäkerhet som gruvindustrin i egenskap av slutanvändare ansåg sig behöva få besvarade för att snabbare och säkrare kunna driva frågan om elektrifiering av fordonsflottan inom den egna verksamheten. Denna sammanställning av synpunkter och frågeställningar har utgjort grunden för projektets innehåll.

Förstudien har genomförts i samverkan mellan RISE Research Institutes of Sweden och Mälardalens universitet (tidigare Mälardalens högskola) med stöd av Epiroc och Gruvindustrins arbetsmiljökommitté (GRAMKO) AG Brand vid SveMin samt i dialog med relevanta räddningstjänster. Arbetet har delats in i arbetspaket med tre relevanta delområden och i huvudsak utförts genom litteraturstudier och intervjuer.

5 Mål

Projektet var indelat i tre arbetspaket. För AP1 har målet varit att kartlägga tidigare genomförda brandtester av fordon med traditionella bränslen och batterifordon. Då genomförda tester på större arbetsfordon med batteridrift i dagsläget saknas har aktuell forskning avseende fristående batterier inkluderats i studien. Studien har också omfattat brandgasernas toxicitet, fordonsbränders utveckling samt brandeffekt och brandens varaktighet. Målsättningen inom AP1 har varit att jämföra dessa parametrar mellan fordonen med konventionell drivlina respektive batteridrift och kartlägga kunskapsgapet gällande batterifordon med fokus på gruvmaskiner. Då en del av utmaningarna vid brand i batterifordon utgörs av den efterhantering som krävs vid denna typ av bränder, till exempel bortforsling och hantering av det skadade batteriet, har kartläggningen av kunskapsläget även innefattat detta område.

Målet med AP2 har varit att sammanställa kunskapsfronten gällande förebyggande brandskydd av batterifordon. I detta arbete har det inkluderats dels passiva brandskyddsåtgärder som exempelvis fordonets inre sektionering och placering av drivlina, dels aktiva brandskyddsåtgärder som brandskyddskontroll, säkerhetsdiagnostik, detektering och släcksystem. Det har också mynnat ut i förslag till fortsatt forskning.

Målet med AP3 har varit att sammanställa räddningstjänstens utmaningar med släckning av fordon i undermarksmiljö och analysera utmaningar med och möjligheterna för släckning av batterifordon under mark. Då elektrifieringen av fordonsdrift i undermarksanläggningar generellt och gruvor och tunnlar under byggnation specifikt ännu är i ett relativt tidigt skede finns endast få dokumenterade erfarenheter från tillbud och olyckor batterifordon under mark. I litteraturstudien kunde två fall av bränder i batterielektriska fordon i underjordsgruvor identifieras. Dialog har förts med GRAMKO och relevanta räddningstjänster för att tillse att förstudien omhändertar de frågeställningar som gruvindustrin själva och räddningstjänsten har som kan utgöra hinder för vidare elektrifiering av arbetsmaskiner och transportfordon inom

gruvnäringen. Till målsättningen har även ingått att översiktligt analysera kraven på luftförsörjning i de räddningskammare som finns placerade inom fordonens arbetsområde och inom de områden nedströms en eventuell brand dit brandgaser kan förväntas att spridas.

Inom samtliga arbetspaket har målet även varit att översiktligt belysa eventuella risker med kabeldrivna gruvfordon.

6 Resultat och måluppfyllelse

Förstudien har bidragit till att kartlägga de kunskapsgap som idag finns avseende brandskyddsfrågor och som kan utgöra ett hinder för vidare elektrifiering av tunga arbetsmaskiner inom gruvindustrin. Genom att tydliggöra viktiga frågeställningar inom det brandtekniska området möjliggör förstudien att dessa vidare utreds och att ett evidensbaserat metodstöd för brandsäkerhetsvärdring, rutiner och insatsplanering kan tas fram i nästa steg.

Förstudiens målsättningar bedöms i stort ha kunnat uppfyllas även om det skett pandemirelaterade förseningar och projektet har behövt förlängas. Det har därutöver varit svårt att hitta information i den utsträckning som varit önskvärt. Det har bland annat varit svårt att studera bränder i kabeldriva elfordon då information kring detta varit i stort sett obefintlig och förstudiens omfattning innebär begränsningar i möjligheten till djupare efterforskning. Förstudien har kunnat påvisa betydande kunskapsluckor inom ämnesområdet.

Förstudien utgör en grund och ett kunskapsunderlag, vilka senare brandförsök i batterier och fordons-mockuper, analyser och utveckling av metodstöd avses att bygga vidare på. Förstudien har bidragit till förbättrade förutsättningar för att i samverkan mellan forskningsinstitut, akademi, fordonsindustri och gruvnäring kunna genomföra de försök som är nödvändiga för att kunna ta fram och vidareutveckla metoder och rutiner för såväl förebyggande åtgärder som i händelse av en brand.

Ett kvalitetssäkrat underlag möjliggör en tryggare implementering av fossilfria arbetsfordon i anläggningar under mark och är av stor nytta för både gruvindustrin och vid byggnation av tunnlar och andra undermarksanläggningar. Då även gruvdrift och byggnation av tunnlar innefattar lokala och regionala transporter bidrar en fossilfri fordonsflotta till det nationella målet⁵ att minska utsläppen 2030 med 70% jämfört med 2010-års nivå. Den svenska gruvindustrin står idag för ca 90% av EU:s totala järnmalsproduktion och gruvnäringen utgör ca 1% av svensk BNP. Alla åtgärder som underlättar omställningen till fossilfria transporter och arbetsmoment inom gruvindustrin bidrar således – och som också utgör ett av FFI-programmets nationella mål – till ett starkt svenskt näringsliv. En betydande andel av europeisk tillverkning av arbetsfordon finns också belägen inom landet och omställningen mot fossilfria alternativ stärker dessa företags position i utvecklingens framkant och bidrar i ett bredare perspektiv till att uppnå de globala klimatmålen.

⁵ Färdplan FFI Energi och miljö - <https://www.vinnova.se/globalassets/mikrosajter/ffi/dokument/fardplan-ffi-energi-och-miljo-2018-08-13.docx>

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Projektresultat sprids genom AP-rapporterna, det White paper som är bilagt denna rapport samt kommer att presenteras på konferensen Nordic and Fire Safety Days i juni 2022.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Resultaten från förstudien avser utgöra underlag för vidare forskning och stöd till utveckling avseende såväl utformning av batterifordons skyddssystem, som räddningstjänstens insatsmetodik.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt		
Introduceras på marknaden		
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut		

7.2 Publikationer

Tre projektinterna publikationer har tagits fram inom respektive arbetspaket. Därtill har ett white paper och ett konferensbidrag skrivits. Konferensbidraget ska presenteras på Nordic Fire and Safety Days 2022-06-22.

Brandt, J. (2022) Fire safety of battery-electric mining vehicles, Project Report. RISE Research Institutes of Sweden.

Martinsen, M. & Dahlquist, E. (2022) AP2: Fires in electric mining vehicles. Mälardalens universitet.

Storm, A. & Kumm, M. (2022). Fire safety of battery electric mining vehicles - WP3 report: Fire and rescue operations, Project Report. Västerås: RISE Research Institutes of Sweden.

White paper som presenteras i Bilaga 1.

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Slutsatser och behov av fortsatt forskning beskrivs i det "white paper" som tagits fram i projektet och som finns som bilaga.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

RISE Research Institutes of Sweden
Jonas Brandt
Jonas.brandt@ri.se

Mälardalens universitet
Madeleine Martinsen
madeleine.martinsen@mdu.se

Epiroc
Erik Svedlund
erik.svedlund@epiroc.com

Bilaga 1 – White paper

Fire safety of battery-electric mining vehicles

A pre-study and knowledge gap analysis

Background

The mining industry, as other industries around the world, is facing a major restructuring to meet the environmental goals. As a part of the change, the industry is moving away from fossil-fueled vehicles and moving towards an increased use of battery-electric vehicles. A challenge in underground mines is the environment in which the vehicles operate and the heavy strain on the vehicles but also the fact that accidents underground can be difficult to handle and have major consequences. A rescue operation in underground facilities places great demands on emergency planning and on knowledge on how fires develop in the current environment and may require extensive resources. In the event of fires in underground mines, the response route is often long, and the time before the actual extinguishing operation can begin may be extended.

Statistics on fire incidents in Swedish mines show that more than half of the fires that have occurred are related to vehicles [1]. The knowledge regarding the development of fires in vehicles with combustion engines is well established and has to a relatively large extent been translated into the conditions prevailing in underground environments. When converting to vehicles with new energy carriers, other conditions and risks need to be considered in safety assessments and action planning. The majority of the new energy carriers used within the mining industry are battery-electric vehicles powered by lithium-ion batteries and hence the pre-study has focused on the differences between fires in these vehicles and in vehicles with conventional fuels.

Vehicle fires

Fires in heavy duty vehicles are most often caused by technical failures such as electrical faults or short circuits, leakage on hot surfaces in the engine compartment and frictional heat from moving parts such as wheels and hydraulic pumps. Fires can also occur due to a crash and can then be caused by broken fuel hoses, electrical short circuits and the friction heat from the crash itself.

The fire risks with battery-electric vehicles are partly different from the fire risks with internal combustion engine vehicles. Battery-electric vehicles do not have an exhaust system with hot surfaces. Also, they do not have a fuel tank or the combustible fluids in the engine compartment found on conventional vehicles. However, the lithium-ion battery adds risks that are not present in vehicles with conventional fuels. The main risks with lithium-ion batteries are thermal runaway, hazardous gas emissions and the risk of the battery re-igniting after the extinguishment [2]. Thermal runaway can occur if the battery is exposed to, for example, external heat, mechanical impact, short circuit or overcharging.

Thermal runaway means that electrical energy is released in the form of heat inside the battery, warms up the battery cells which in turn increases the thermal runaway. The more the

temperature in the battery increases, the faster the thermal runaway accelerates causing a self-generating process. During thermal runaway, there is a risk that the electrolyte of the battery releases, ignites and produces toxic gases [3–5]. In case of incomplete combustion, there is also a risk that the released battery gases create an explosive atmosphere if they accumulate [6–8].

Gap analysis

Some fire tests on battery-electric vehicles in the form of passenger cars have been performed [5, 9, 10], but no documented full scale fire tests on battery-electric mining vehicles have been found in the literature. When it comes to heavy vehicles with conventional fuels, only a few fire tests with measurements of heat release rate, temperature and gas emissions have been performed in mining environments and then on older machines [11]. The fire load in modern vehicles has increased as a result of the vehicles containing a larger amount of plastics and other combustible materials, which means that these test results are not fully representative of today's vehicles.

The experience and knowledge of how fires develops and spreads in heavy battery-electric vehicles and how a fire in other parts of the vehicle affects the lithium-ion battery is still limited. Preliminary subpack tests [12] have shown that fire spread from a burning tire to the battery can take significant amount of time, but at the same time, results from previous full-scale firefighting tests [13–20] indicate that the available time to suppress the fire and cool the battery before it gets involved in the fire will still be shorter than the time required for the BA-firefighters (firefighters with breathing apparatus) to reach the scene of the fire.

The knowledge gap also includes the risk of emissions of toxic and potentially explosive battery gases from a heavy vehicle in a mining environment. It should be investigated if the normal ventilation in mines is sufficient to minimize the risk of a flammable mixture of battery gases occurring or if ventilation measures need to be enforced to ensure a safe environment for rescue personnel and avoid gas explosions in the mine. Response plans for rescue operations in the event of a fire in battery-electric mining vehicles may need to be developed.

A fire and rescue operation in a mining environment is not substantially different during a fire in a battery-electric mining vehicle compared to other mining vehicle fires, and the conventional challenges related to long response routes [13–15], movement in smoke-filled environment [15–20] and the limitations [21] of the ceiling height remain unchanged. The electrification of the mines does however bring additional challenges to the list, which pinpoints the need of further knowledge in the firefighting community and may require adjustments to the tactics and methods used when dealing with battery fires.

Experience from earlier fire incidents in battery-electric passenger cars [6, 22] has highlighted the difficulties with extinguishing battery fires due to the inaccessibility of the battery, the recurring reignition and the substantial volumes of extinguishing water needed. NFPA [23] recommends that a minimum of 2,600 gallons (approximately 10,000 liters) of water is applied, depending on the size and the location of the battery. The size of the battery in an electrified mining vehicle will be larger than in a passenger car. Given the challenging underground conditions mining vehicles operate in, the protective casing of the battery pack can also be considered to be more durable [24]. It can therefore be more difficult to both reach the relevant part of the battery with a water jet and require larger volumes of water to sufficiently cool down the temperature of the battery and control the fire.

In the event of a fire in a mine, evacuation may occur to rescue chambers located near the miners' 'workplaces'. The Swedish requirements for a rescue chamber's air supply are based on knowledge from fires and fire tests with vehicles with conventional fuels [25]. Experiences from a boom truck fire [26] in 2020, which required a 10-hour use of the refuge chambers, indicate that the Swedish air supply requirements should be reviewed, but it is currently not clear what capacity and operational time is sufficient in the event of a fire in large battery-electric vehicle. Further studies are therefore required to be able to plan the preventive fire protection work, carry out the necessary risk analyzes and develop action plans.

Further development is also needed to investigate the extent to which active and passive safety systems cost-effectively can reduce the probability of and mitigate the consequences of a fire in a battery-electric mining vehicle. Protection systems that may be relevant include, for example, thermal insulation of batteries, complementary systems for detecting critical conditions in the batteries in addition to the integrated Battery Management System (BMS) and various types of systems for injection of extinguishing and cooling agents into the battery pack. Other safety measures that might serve a special purpose in mining environments includes, for example, enhanced physical protection of vehicle batteries. Occasionally rock falls in mines during operation, which usually not causes any major consequences. However, it has not been investigated what the consequence would be if a battery-electric vehicle would be exposed to a heavy rock fall. Li-ion batteries are sensitive to physical impact and if a battery-electric mining vehicle is buried under rocks and the vehicle's batteries as a result end up in thermal runaway and fire, it is not difficult to imagine that the rescue operation could be quite complicated.

Battery-electric mining vehicles have many benefits. They do not generate exhaust gases, have a higher efficiency, require less maintenance, and could possibly lead to lower fire risks in mines than today's conventional vehicles. However, additional research and development is necessary to reach that point and bridge the knowledge gap described in this paper.

References

- [1] "Årsrapport 2016 Brandtillbud," Gramko Arbetsgrupp Brand, SveMin, 2016.

- [2] "Vägledning, räddningsinsats där litiumjonbatterier förekommer," Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB), 2020.
- [3] C. Petit-Boulanger, J. Thomazo, B. Azmi, O. Labadie, B. Poutrain, M. Gentileau and H. Bazin, "A Partnership between Renault and French First Responders to Ensure Safe Intervention on Crash or Fire-Damaged Electrical Vehicles, PaperNo.15-0252-O," in 24th Enhanced Safety of Vehicles Conference, Gothenburg, 2015.
- [4] B. Truchot, F. Fouillen and S. Collet, "An experimental evaluation of toxic gas emissions from vehicle fires," *Fire Safety Journal*, vol. 97, pp. 111-118, 2018.
- [5] O. Willstrand, R. Bisschop, P. Blomqvist, A. Temple and J. Anderson, "Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles, RISE Report 2020:90," RISE Research Institutes of Sweden AB, Borås, 2020.
- [6] National Transportation Safety Board, "Safety Risks to Emergency Responders from Lithium-Ion Battery Fires in Electric Vehicles, Safety Report NTSB/SR-20/01," 2020.
- [7] F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist and B.-E. Mellander, "Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires," *Sci Rep* 7, 10018, 2017.
- [8] M. Henriksen, K. Vaagsaether, J. Lundberg, S. Forseth and D. Bjerketvedt, "Explosion characteristics for Li-ion battery electrolytes at elevated temperatures," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 371, pp. 1-7, 2019.
- [9] P. Sturm, P. Föbleitner, D. Fruhwirt, S. Heindl, B. Kohl, O. Heger, R. Galler, R. Wenighofer och S. Krausbar, "BRAFA" - Brandauswirkungen von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen," Graz University of Technology, 2021.
- [10] S. Recoskie, D. MacNeil, J. Perron, S. Touchette, B. McLeod, K. Hendershot, "Thermal Propagation Testing of Electric Vehicles", National Research Council Canada, 2021
- [11] R. Hansen and H. Ingason, "Full-scale fire experiments with mining vehicles in an underground mine, SiST Research Report 2013:2," Mälardalen University, Västerås, 2013.
- [12] O. Willstrand, "Battery Fire Tests," 2021.
- [13] M. Kumm, A. Palm, K. Palmkvist, A. Lönnermark and H. Ingason, "Räddningsinsats i tunnelmiljö: Fullskaleförsök i Tistbrottet, Sala," Mälardalens högskola, Västerås, 2014.
- [14] A. Bergqvist, H. Frantzych, K. Hasselrot and H. Ingason, "Fire and rescue operations in tunnel fires: a discussion of some practical issues," in *Handbook of Tunnel Fire Safety*, London, ICE Publishing, 2011, pp. 589-612.
- [15] H. Ingason, M. Kumm, D. Nilsson, A. Lönnermark, A. Claesson, Y. Z. Li, ... and A. Palm, "The Metro Projekt - Final Report," Mälardalens Högskola, Report SiST 2012:8, Västerås, 2012.
- [16] A. Palm, M. Kumm, A. Storm and A. Lönnermark, "Breathing air consumption in the fire tests at the Tistbrottet mine," *Fire Safety Journal*, 2022.
- [17] M. Kumm, "Räddningstjänstens förflyttningshastighet under mark: En förstudie om slangdragning i olika undermarksmiljöer, SiST 2010:05," Mälardalen University press, Västerås, 2010.
- [18] M. Kumm and A. Palm, "The fire and rescue services moving speed in underground mass transport systems, Report SiST 2012:3," Mälardalen University, Västerås, 2012.
- [19] H. Ingason, A. Lönnermark, H. Frantzych and M. Kumm, "Fire incidents during construction work of tunnels, SP Report 2010:83," SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås, 2010.
- [20] H. Ingason, L. Vylund, A. Lönnermark, M. Kumm, K. Fridolf, H. Frantzych, A. Palm and K. Palmkvist, "Taktik och Metodik vid brand i Undermarksanläggningar (TMU) - sammanfattningsrapport," SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås, 2015.
- [21] H. Ingason, A. Bergqvist, A. Lönnermark, H. Frantzych and K. Hasselrot, "Räddningsinsatser i vägtunnlar, P21-459/05," 2005.
- [22] R. Bisschop, O. Willstrand and M. Rosengren, "Handling Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Preventing and Recovering from Hazardous Events," *Fire Technology*, vol. 56, pp. 2671-2694, 2020.
- [23] R. T. Long Jr, A. F. Blum, T. J. Bress and B. R. T. Cotts, "Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results," 2013.
- [24] D. Rulli, "Ontario Mine Rescue: Emergency Response to Battery Fires," One-Day Symposium: Battery Electric Vehicle Safety in Mines, 2020. [Online].
- [25] A. Storm, M. Kumm and J. Söderström, "Räddningskammare: översyn och revidering av vägledning, RISE Rapport 2020:35," RISE Research Institutes of Sweden AB, Västerås, 2022.
- [26] S. Holmk and C. Harr, "Incident summary: Onaping Depth BEV fire," Virtual Symposium: Battery Electric Vehicle Safety in Mines, 2021. [Online].