



Brand i elfordon och laddningsplatser i undermarksanläggningar

Sone Torbjörnsson

RISE Report 2019:84

Brand i elfordon och laddningsplatser i undermarksanläggningar

Sone Torbjörnsson

Abstract

Fire in Electric Vehicles in Underground

Due to the increasing demand to minimize the global pollution, the research has made significant advances in electrically powered vehicles. This interest has also spiked in the mining industry since the current diesel-powered vehicles emits exhaust and particles, which results in the need for a costly ventilation system. But switching from a known, and widely used, propulsion system results in a step towards the unknown. This literature survey has mainly studied battery electric vehicles (BEV).

This literature survey focusses on the issues related to thermal runaway of a battery and what it might cause. This includes the toxicity of gasses and combustion products, the impact on rescue operations, the effect on extinguishment and differences in fire behavior between BEVs and internal combustion engine (ICE) vehicles.

Full scale experiments have shown that the fire behavior might not depend solely on the energy storage as other component also contribute to the overall fire behavior as whole. These experiments have been conducted on single passenger vehicles and not mining vehicles, and it is reasonable to draw the conclusion that batteries as an energy storage do not change the overall fire behavior considerably. Changes do, however, occur when it comes to the extinguishment of a fire, since the battery design interferes with the possibility to cool the battery cells effectively. This difficulty in cooling the battery cells makes it very challenging prevent thermal runaway to stop a thermal runaway and propagation event inside the battery using conventional fire suppression methods.

Key words: Electric mining vehicles, Rescue operations, Underground mining, Fire suppression, Thermal runaway, Lithium-ion battery,

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Report 2019:84

ISBN: 978-91-89049-14-7

Borås 2019

Innehållsförteckning

Abstract	1
Innehållsförteckning	2
Förord	3
Sammanfattning	4
1 Inledning	5
2 Elfordon	6
3 Batterier	8
3.1 Uppbyggnad.....	8
3.2 Säkerhet	9
3.3 Riskfaktorer	10
3.3.1 Brand och explosion	11
3.3.2 Toxicitet.....	13
4 Gruvor	15
4.1 Statistik för bränder i gruvor	16
4.2 Brandförlopp och rökspridning.....	16
4.2.1 Brandförlopp	16
4.2.2 Rökspridning	18
5 Skillnader mellan fordon med förbränningsmotor och elfordon	20
5.1 Toxicitet	20
5.2 Fullskaliga brandförsök.....	21
6 Detektion av termisk rusning	25
7 Experiment med släckning av batterier	26
8 Räddningstjänst och personal	28
8.1 Räddningstjänst.....	28
8.2 Självutrymning	30
8.3 Skyddsutrustning.....	31
9 Diskussion	32
10 Slutsatser	35
11 Framtida forskning	36
12 Referenser	37

Förord

Denna litteraturstudie upprättades i syfte att sammanställa befintlig information om elfordon i undermarksanläggningar.

Först vill jag tacka Haukur Ingason för god handledning och många goda råd. Vidare vill jag även tacka Max Rosengren och Jonatan Gehandler för viktiga synpunkter i litteraturstudiens startskede och Samuel Bäckman för att ha delat med sig av sin kunskap gällande gruvor.

Projektet har finansierats av TUSC (*Tunnel and Underground Safety Centre*).

Fotot på framsidan är taget av Per Rohlén vid försök med en hjullastare i Tistbrottet som genomfördes i Sala 2011.

Sammanfattning

Genom att introducera elfordon i gruvmiljöer kan fördelar gällande hälsa och arbetsmiljö erhållas. Med detta ändras dock även riskbilden genom att ett nytt bränsle introduceras, som i sällsynta fall, kan medföra haveri utan några förvarnande tecken. Samtidigt kan fel detekteras och hanteras tidigt genom ett så kallat BMS (Battery Management System) som ständigt övervakar batteriet. Propagering mellan celler och moduler kan förhindras genom aktiva system eller passivt brandskydd.

Gaserna som bildas hos ett brinnande Li-jonbatteri påminner till stor del om ”vanliga” förbränningsprodukter, däremot kan batterier ventileras stora mängder gas även utan brand vilket ger vissa skillnader. Gaserna som ventileras ut består bland annat utav kolväten, CO, CO₂ och vätgas, där volymfraktionerna påverkas av t.ex. laddningsgrad. Brandbeteende för de ventilerade gaserna påminner om andra gasformiga kolväten, exempelvis metan, dock med ett större brännbarhetsområde. Vid överladdning kan det produceras stora mängder vätgas, men normalt finns system som förhindrar att överladdning sker. Hur mycket brandgaser som bildas, i volym, under fullskaliga försök med fordon med förbränningsmotorer respektive elmotorer har inte nämnts, men den summerade massan av gaserna var lägre för elfordon.

Vid gjorda försök med elfordon och fordon med förbränningsmotorer har brandförloppet haft liknande utseenden. När det kommer till HF är produktionen större för bränder i elfordon, men skillnaderna uppkommer först när batteriet är inblandat. Denna tiden varierar bland annat på faktorer som batterikemi, batteridesign, storleken på brand och var initialbranden startar i förhållande till batteriet. Vid försök har även visuella observationer gjorts angående volymen rök som producerades.

Släckning av Li-jonbatterier har bäst effekt om släckmedlet har god värmekapacitet och kan appliceras på omkringliggande celler där termisk rusning sker och på så vis ge en kylande effekt. Med detta finns dock svårigheter eftersom det yttre skyddshöljet ska skydda mot fukt och damm, vilket medför att större mängder släckmedel krävs vid bränder i elfordon. Vidare är Li-jonbatterier även benägna att återantända genom hög intern värme, varpå insatsen kan bli långvarig. Ytterligare svårigheter med släckinsatser i gruvmiljö är att det kan vara svårt för räddningstjänsten att kunna ta sig till branden, framförallt om ventilationen inte klarar av att ventileras ut eller påverka brandgasernas spridning. Inträngning i rök är ett svårt moment som tar stora resurser i anspråk.

När det kommer till räddningspersonalens säkerhet kan en brand i gruvmiljö värma upp berget och resultera i spjälkning vid tillförsel av släckmedel. Utöver detta hot bildas många toxiska ämnen vid brand varav några har förmågan att penetrera skyddsklädseln, dock visar försök att dagens ställ förmodligen har en god förmåga att hindra genomträngning av HF. Försök har än så länge bara gjorts i liten skala med små prover och som alltid ska rökexponering minimeras.

1 Inledning

I dagens samhälle har miljödebatten blivit ett stort samtalsämne och det eftersträvas att minska den negativa påverkan på miljön som människan orsakar. En miljöpåverkande faktor är användning av fossila bränslen som vid förbränning avger växthusgaser. Genom att skifta till eldrift kan mängden utsläpp minskas, vilket således även medför en bättre arbetsmiljö genom att minska exponeringen av avgaser för de anställda. Eftersträvan att minska utsläppen av växthusgaser har drivit på en utveckling av elfordon. Utvecklingen av elfordonens tillämpningsområden sprider sig även till industrier som bland annat gruvindustrin, vilket är rapportens huvudinriktning – elfordon i undermarksanläggningar. Litteraturstudien har genomförts av RISE, finansierat av TUSC och kommer att sammanställa aktuell information om hur riskbilden ser ut vid byte till elfordon och svårigheterna med räddningsinsats i anläggningar under mark så som gruvor och tunnlar under byggnation.

En gruva är ett komplext objekt när det kommer till räddningsinsatser och utrymning. I ett utrymme som en underjordsgruva medför det ofta ansamling av rök, vilket ofta kräver brandgasventilation. På grund av den slutna miljö och den rådande regleringen för ventilation i gruvor, kan en brand resultera i att röken ackumuleras varpå möjligheterna till självutrymning påverkas eller rent av omöjliggörs och skydd får ske via räddningskammare. Toxiciteten hos brandgaser utgör ett stort problem för evakuerande och även för räddningstjänsten vid inträngning i rök. Vid situationer som innebär livräddande insatser är det räddningstjänstens uppgift att utföra de nödvändiga åtgärderna för att rädda den nödställda personalen. För att räddningstjänsten ska kunna uträtta en effektiv insats behövs information om hur brandförloppet ser ut, brandens position i gruvan och risker som elfordon medför.

På grund av de förekommande restriktionerna som Arbetsmiljöverket upprättat gällande bränsle får inte bensin, gas eller etanol användas till förbränningsmotorer under mark. Elfordon är dock inte explicit reglerat i Arbetsmiljöverkets föreskriveter. Vissa typer av elfordon har brukats under en lång tid inom gruvindustrin. Till och med batteridrift introducerades 1985 av Kiruna Trucks till fordon som i huvudsak försörjdes genom elspår i taket. Tekniken skiftade dock över till dieselmotorer som det sekundära kraftsystemet.

Problematiken för brand i gruvor eller tunnlar under byggnation är inget nytt fenomen, men har genom erfarenheter hanterats till en acceptabel risk. Övergången till elfordon medför, genom att introducera nya bränslen, andra risker och brandbeteenden där det inte finns ett lika brett utbud av erfarenheter. Litteraturstudien har i avseende att sammanställa befintlig information gällande brandförlopp gällande elfordon, toxiciteten gällande rökgaserna som ett havererande batteri medför och släckning av litium(Li)-jonbatterier.

Projektet har i sin helhet behandlat elfordon i undermarksmiljö, men har riktats mot aspekter för gruvindustrin på grund av bland annat intresset som finns, men även fördelarna gällande hälsoaspekter och miljö. Som bränslekälla har i huvudsak Li-jonbatterier tagits i beaktande då de har för tillfället högst energidensitet på dagens marknad. Litteraturstudien har inte beaktat kolgruvor.

2 Elfordon

När det gäller bränsle i undermarksanläggningar, som gruvor, har Arbetsmiljöverket definierat olika typer av bränslen som inte är tillåtna att nyttjas av förbränningsmotorer i sådana utrymmen och restriktionerna innefattar bensen, etanol och gas, detta förbud gäller dock inte räddningsfordon [1]. Övergången från förbränningsmotorer till elektriska motorer medför positiva aspekter gällande arbetsmiljön, som bland annat utsläppet av avgaser från förbränning upphör och en minskad ljudnivå [2]. Genom att använda elfordon i en sluten gruva kommer ventilationen, som är en stor utgift inom gruvindustrin, inte att behövas för att transportera ut hälsovådliga ämnen, utan kan regleras efter behovet av syre och temperatur [3]. Det uppstår även mindre effektförluster i en elektriskmotor än en förbränningsmotor [4]. Ett problem med dagens batterier, som används till fordon, är att de har betydligt lägre energidensitet än diesel [2]. Denna minskning i energidensitet medför således att en storleksökning av batterierna skulle krävas för att tillgodose samma energimängd. På grund av den storleksökning som skulle krävas för att tillgodose energibehovet lämpar sig batterier som energilagring, gällande tunga fordon, bättre för rörelse inom ett mer begränsat område [2]. Exempelvis produceras det gruvfordon som har en totalvikt på cirka 37,7 ton och har Li-jonbatteri vars massa är 5,1 ton [5]. Till skillnad från traditionella förbrukarbatterier har traktionsbatteriet på elfordon ingen av sina poler jordade mot chassit, varpå kabel slitage sällan ger upphov till brand [6]. Det vanliga 12/24-voltbatteriet finns dock kvar även på elfordon [7].

Paraszczak m.fl. [8] skriver om olika typer av elfordon och skillnaden med eldrift istället för förbränning av diesel. Elfordonen som studeras i rapporten är fordon gällande lastning och transport för material i gruvor. Fördelarna med att använda elfordon i underjordsgruvor är bland annat minskade utsläpp och värme, mindre service och bättre vridmoment. Med ett ökat djup i gruvindustrin kommer den omgivande temperaturen att öka, varpå en kylanläggning kan behövas. Vid användning av dieselmotorer, som avger värme, kommer kylanläggningen få kyla båda värmekällorna, vilket talar för användning av elfordon gällande gruvdrift på djupa nivåer. Elfordon kan kategoriseras enligt tre olika energiförsörjningssystem; batteripaket, elkabel eller elspår installerat i taket. De tre olika systemen kan nyttjas olika effektivt för olika delar i en gruva. De uppenbara nackdelarna med system som kabel och elspår medför är givetvis restriktioner i rörligheten. Batterifordon har inte samma restriktioner gällande rörlighet eftersom energikällan är ihopkopplat och rör sig med fordonet, men i gengäld medför dagens batterikemier lägre energidensitet än diesel vilket medför kortare arbetstider till laddning. Vid användning av elkabel lägger fordonet ut en efterföljande elkabel vilket medför restriktioner i rörlighet för fordonet, men det hindrar även fler fordon från att arbeta inom samma område. Den kabel som läggs ut är också exponerad för att kunna ta skada från olika föremål inom en gruva. Elspår i taket har ytterligare restriktioner gällande rörlighet och måste kombineras med någon annan form av motor. Detta sätt gällande energiförsörjning kan dock nyttjas i långa rampsystem som används regelbundet.

Halim & Kerai [9] har skrivit en rapport gällande skillnader mellan elfordon och dieseldrivna fordon i gruvmiljö, men även om ventilationsbehovet i en gruva. Vid användning av diesel som bränsle för förbränningsmotorer avges luftföroreningar och

partiklar. För att uppfylla adekvata luftkvaliteter och temperaturer behövs således mekanisk ventilation. Ventilationen utgör en stor kostnad inom gruvindustrin och kan stå för upp till 40% av den totala energikonsumtionen för gruvans verksamhet. För att minska kostnaderna för ventilationen kan övergången till elfordon vara gynnsamt, eftersom en elmotor inte medför några utsläpp av luftföroreningar, fukt eller partiklar och producerar enbart en tredjedel av värmen som en motsvarande dieselmotor avger.

Paraszczak m.fl. [10] skriver om en batteridrivna gruvtruck som användes i en gruva i Kanada. Enligt specifikationen från tillverkaren varar en laddning i drygt fyra timmar varpå laddning, eller byte av batteri, måste ske. Detta benämner författarna som det stora problemet med batterifordon, energidensiteten är för låg för att konkurrera ut diesel som bränsle i samtliga avseenden. Dock har de minskade utsläppen av föroreningar som ett batterifordon medför en fördel i djupa gruvor, eller där problematik med ventilation kan uppstå.

Rajashekara [11] har skrivit en rapport om framtida utveckling gällande elfordon. Utav bly-batterier, nickel-metall-hybridbatterier och Li-jonbatterier, är det Li-jonbatterier som har mest fördelaktiga elektrokemiska egenskaper för elfordon. Utvecklingen av litiumbatterier tror författaren kommer att gå mot litium-luftbatterier som teoretiskt kan ha snarlik energidensitet som bensin. Litium-luftbatteriet är fortfarande på forskningsstadiet och utveckling pågår men det finns svårigheter med ett begränsat antal laddningscykler och författaren uppskattar att, innan denna batteritypen blir lämplig för elfordon, kan det dröja 15 år. Bränslecellen är ytterligare ett exempel på vad som kan komma att utvecklas. Enligt författaren tyder det på att bränslecellen kan komma att fungera som extra energi som laddar ett större batteri för att öka räckvidden på fordon. Inom 15 – 20 år skulle majoriteten av fordonen vara baserade på elektricitet. För fordon med endast en energikälla, således inga hybrider, tror författaren att Li-jonbatterier eller Li-luftbatterier kommer att vara dominanta på marknaden.

Trots att dagens eldrivna gruvfordon kanske inte kan konkurrera ut dieseldrivna gruvfordon som den enda energikällan i gruvor tror Paraszczak m.fl. att gruvfordon som drivs av elektricitet kommer bli mer eftertraktade framöver, i och med utvecklingen av batterier [8]. När det kommer till gruvor i Sverige finns ett intresse för användning av batteridrivna gruvfordon och till exempel Boliden deltar i projekt där denna typ av maskiner utvecklas och testas [12].

3 Batterier

De batterikemier som är mest förekommande när det gäller fordonsapplikationer är Li-jonbatterier och nickel-metall-hydridbatterier (NiMH) [6]. Fördelarna med li-jonbatterier är bland annat att de har högre energidensitet och tål många laddningscykler [2]. Utöver dessa finns det även andra batterier som är under utveckling för att kunna tillämpas som energilagring, exempelvis natriumjonbatterier [13], natrium-metall-halidbatteri (NaMx) [14], kaliumjonbatterier [15] och lithium-luftbatterier som nämndes i föregående kapitel. När det gäller användningen av batterier är en begränsning energidensiteten. De batterier som tillverkas i dag har ett lägre energiinnehåll jämfört med motsvarande vikt av traditionella drivmedel som exempelvis diesel [2].

3.1 Uppbyggnad

Utav de tidigare nämnda batterikemierna är det framförallt Li-jonbatterier av olika typer som är mest förekommande gällande energilagring för fordon som enbart drivs av elektricitet [16], närmare bestämt med katodmaterialen litium-järn-fosfat (LFP) eller litium-nickel-mangan-kobolt-oxid (NMC) [17]. NiMH-batterier är uppbyggda med en vattenbaserad, icke-brännbar, elektrolyt medan för Li-jonbatterier används en organisk, och brännbar, elektrolyt [18]. En vattenbaserad elektrolyt kan inte användas för Li-jonbatterier eftersom cellens spänning är för hög [19].

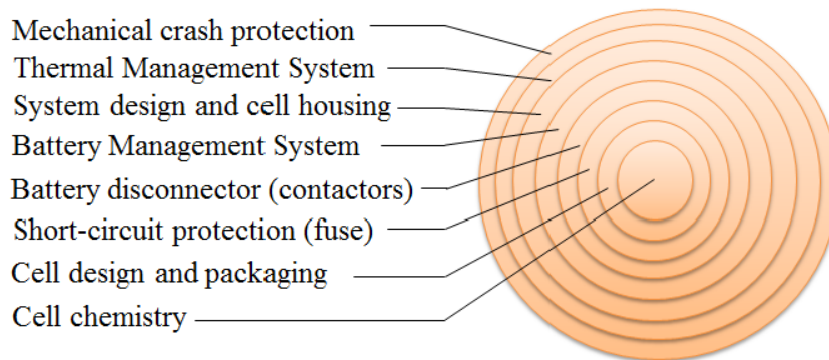
Ett Li-jonbatteri som används till fordon består utav olika moduler som är sammankopplade. Dessa moduler består i sin tur av flertalet sammankopplade celler. Li-jonbatteri är ett familjebegrepp och cellerna kan vara uppbyggda genom olika kemiska sammansättningar av grundämnen för att få önskade kemiska egenskaper på batteriet [20]. Dessa komponenter kan förpackas på olika sätt vilket medför olika fördelar respektive nackdelar. De tre förpackningssätt som är mest förekommande är cylindriska celler, prismatiska celler och pås-celler [6]. Beroende på vilken packningsmetod som nyttjas påverkas dels möjligheterna för kylning och dels energitätheten på modul och batteripacknivå. Genom att välja cylindriska celler fås sämre förpackningstäthet av cellerna och således sämre energidensitet, men i gengäld kan kylning ske på ett mer effektivt sätt eftersom det finns tomrum mellan de olika cellerna [2]. Vidare skriver Bisschop m.fl. att pås-celler har en högre förpackningstäthet vilket medför svårigheter med kylning av cellen.

En Li-jonbattericell är uppbyggd av en anod, en katod, två strömledare, en elektrolytlösning och en separator [2]. I anoden, där kol är det mest förekommande materialet, finns litiumjoner lagrade genom interkalation när ett batteri är fulladdat [16]. Katoden består ofta utav en litiumlegering som, beroende på vilken legering som används, kan dels vara mer eller mindre tolerabla mot felaktig användning eller dels ha olika specifika energier [2]. För att förhindra elektrontransport mellan dessa elektroder sitter en separator [21], vilken tillåter genomströmning av Li-joner [2]. De strömledare som används för Li-jon-batterier är ofta utav aluminium vid katoden [19] och koppar vid anoden [21]. För att få en god jontransport är samtliga delar mättade med en elektrolyt, vanligtvis en organisk elektrolyt med löst LiPF₆-salt [20]. Alla dessa komponenter är

inkapslade med ett omgivande hölje vars funktion är att skydda från oönskade partiklar, fukt och mekanisk påverkan [19].

3.2 Säkerhet

Larsson [19] skriver om vikten av att arbeta ur ett helhetsperspektiv gällande säkerhet för Li-jonbatterier, se Figur 1. En viktig del är *battery management system* (BMS) som ska övervaka och reglera batteriets drift så att det inte används vid skadliga elektriska spänningar eller temperaturer. Bland annat ska BMS reglera spänningarna i cellerna så att cellerna inte överladdas eller laddas ur för mycket. Utöver laddningsrelaterade problem kan ett BMS även skydda mot extern kortslutning och exponering för mindre uppvärmning. Det kan dock inte skydda mot intern kortslutning, deformation eller stor uppvärmning. Därför skyddas fordonsbatterier genom placering i säkra zoner samt kan det finnas olika säkerhetslösningar i batteriet som syftar till att enkelcellsfel ej propagerar till närliggande celler och moduler [2].



Figur 1 En schematisk skiss över helhetsperspektivet för Li-jonbatterier. Publicerad med tillstånd av författaren [19]

När det kommer till säkerhet gällande Li-jonbatterier finns det olika typer av säkerhetsmekanismer som tillsammans bidrar till säkerheten. Ytterst på batteriet finns det ett yttre hölje som ska hindra mot mekanisk skada, men även mot fukt [19] och infallande värmestrålning [6]. Inuti cellen finns det säkerhetsmekanismer som ska hindra oönskade händelseförlopp. Cellkemin är en viktig faktor att beakta eftersom olika katodkemier medför olika stora riskbilder [16]. Separatoren kan användas som strömbrytare, som vid förhöjda temperaturer smälter ihop och hindrar Li-jontransporten genom separatoren vilket resulterar i att strömmen bryts [6] [21]. Detta gäller framförallt vid små batterier och ger inte lika god effekt som säkerhet för stora batterier [22]. Det har även gjorts försök med att tillsätta släckmedelkapslar i elektrolyten vilka reagerar vid höjda temperaturer och absorberar värme [23]. Det finns även olika metoder att bryta kretsen för ett batteri och sker genom säkringar och kontaktorer [24]. Det ska dock noteras att om en cell havererar behöver det inte få katastrofala följder om spridningen begränsas till enbart den ursprungliga cellen, varpå det är viktigt att förhindra propagering mellan celler eller moduler [19].

Ruiz & Pfrang [25] skriver om olika sätt hur propagering, spridning av termisk rusning mellan celler, kan förhindras genom olika passiva skydd. Om angränsade celler är i fysisk kontakt med varandra sker nästan alltid vidare uppvärmning av de angränsande cellerna. Problemet kan lösas med olika metoder; dels genom att separera cellen med termisk rusning från andra celler, dels skärma av för att hindra uppvärmning. Passiva skydd kan användas för att minska konsekvensen av en havererande cell och kan användas mellan olika delar av batteriet som mellan celler, moduler och batteripack. De olika metoderna som nämnts är: avstånd mellan cellerna, värmeledande material, expanderande material, isolerande material och värmeskyddande barriär.

3.3 Riskfaktorer

Li-jonbatterier har ett "fönster" för optimala driftförhållanden med avseende på temperatur och elektrisk spänning [2]. Den drifttemperaturen som anses vara optimal för Li-jonbatterier bedöms vara kring 20 – 40 °C [25]. Vidare skriver Ruiz & Pfrang vikten av att det inte ska förekomma för stora temperaturskillnader mellan de olika cellerna, men detta gäller även inuti cellen. När det kommer till temperaturhomogenitet på ytan för stora Li-jonbattericeller finns vissa svårigheter eftersom värmeledningen till en sensor kan ta tid, vilket kan leda till fördröjning till detektion av förhöjda temperaturer [21]. När det kommer till Li-jonbatterier är termisk rusning en riskfaktor som måste beaktas. Termisk rusning innebär att en dominoeffekt av exoterma reaktioner sker inuti cellen [26]. Hur dramatisk den termiska rusningen blir beror på laddningsgrad, där en högre laddningsgrad medför en mer dramatisk termisk rusning [6]. Den kritiska temperaturen när termisk rusning är svår att förhindra är vanligtvis kring 150 – 200 °C [19].

Bisschop m.fl. [2] har sammanställt olika faktorer för haveri, men även kategoriserat orsakerna för batterihaveri enligt följande kategorier:

Laddning

Vid överladdning tvingas mer litiumjoner till anoden än vad den klarar av att interkallera. Detta kan resultera i att det bildas metalliska beläggningar av litium, vilket formas i dendriter som succesivt kan växa. Tillväxten av dendriter kan även påverkas av temperaturen och vid laddning under 0 °C sker en påskyndad tillväxt vilket bör undvikas. På katoden sker motsatsen, där bryts katoden ner vilket sker genom exoterma reaktioner.

Laddningshastigheten, som har beteckningen C, kan också orsaka skada där för höga strömstyrkor kan leda till uppvärmning av batteriet. Vid en Laddningshastighet av 1C innebär det en strömstyrka som motsvarar cellens kapacitet i amperetimmor (Ah), och ett urladdat batteri laddas följaktligen på en timme. 2C motsvarar dubbel strömstyrka mot batteriets kapacitet. Baserat på flera olika försök drogs slutsatsen att det finns risk att skada på batteriet kan uppstå om ett batteri utsätts för laddningshastigheter större än 0,5 C.

Urladdning

Över-urladdning inträffar när laddningen i seriekopplade celler är i obalans och en cell har mindre laddning än de övriga i den kopplade serien. Om en cell laddas ur för mycket kan reaktioner uppstå i cellen, vilket kan leda till termisk rusning när cellen laddas igen.

Av denna anledning är det viktigt att hålla sig inom specifikationens gränser för batteriet, dock finns det säkerhetssystem som ska förhindra laddning av sådana batterier.

Mekanisk skada

Vid mekanisk skada kan batteriets celler deformeras så att olika isolerande material kan skadas. Detta kan ge upphov till kortslutning och ventilering av gaser, vilket kan ge ett snabbt brandförlopp.

Intern kortslutning

Intern kortslutning är ett haveri som kan vara svårt att detektera innan det inträffar, vilket gör det till det största orosmomentet gällande haverier. Intern kortslutning kan uppkomma genom att dendriter penetrerar separatorn, men även från fel i tillverkningsprocessen i form av föroreningar eller förekomsten av interna skador. Vid intern kortslutning uppstår höga strömstyrkor vilket värmer omkringliggande material genom *Joule heat generation* varpå termisk rusning kan ske.

Extern kortslutning

Extern kortslutning sker via mekanismer från utsidan, exempelvis kortslutning mellan polerna, korrosion och nedsänkning i saltvatten eller föroreningar. Vid försök med olika former av elektrisk kortslutning har det visat sig att det kan leda till tryckuppbyggnad och ventilering.

Exponering av värme

För denna typ av haveri finns det en standard för vägfordon (UNECE R100) som testar ett fullskaligt batteri, eller moduls, förmåga att stå emot en brand. Brandens storlek beror på batteriets utformning och varar i två minuter.

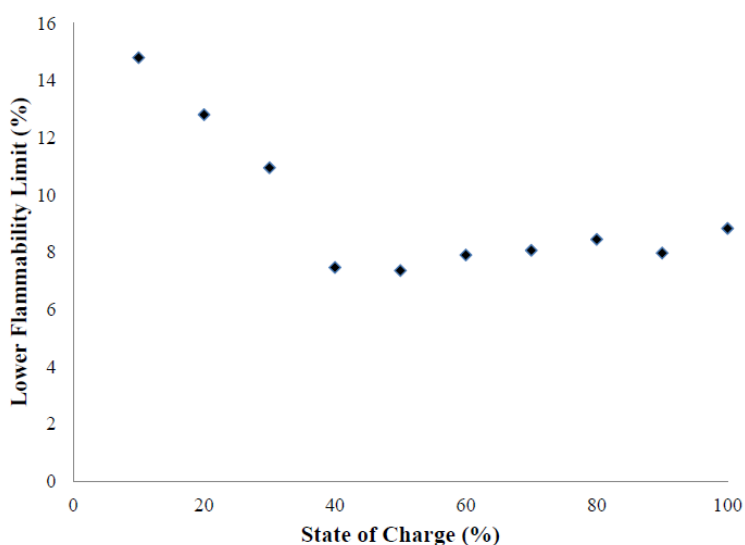
Feng m.fl. [27] studerade hur spridningen av termisk rusning sker mellan celler och moduler. För Li-jonbatterier finns det standardtester som ett batteri ska genomgå, men trots detta förekommer risken för haveri. Författarna genomförde experiment för att se hur propagering sker mellan celler och moduler för stora format på celler, som är inuti ett skyddshölje. Batterierna som användes under försöken var två celler i en batterimodul, tre av batterimodulerna var sedan ihopkopplade till att bilda ett batteripaket. Cellparen var omslutna av ett skyddshölje och låg dikt an mot nästa batterimodul. Den metod som användes för att initiera termisk rusning var penetrering med metallspik från ena sidan, varpå temperaturen mättes för vid olika punkter i batteripaketet. Från försöken drog författarna slutsatsen att brandens flammor har en liten inverkan på propageringen mellan batterimoduler och majoriteten av värmeöverföringen uppkom via ledning av värme mellan batterimodulernas hölje.

3.3.1 Brand och explosion

Om en cell i ett Li-jonbatteri av någon anledning havererar och värms upp, kan det medföra att gaser produceras inuti battericellerna som sedan ventileras ut när övertrycket blir tillräckligt stort [2]. Den gas som ventileras ut när tryckavlastning sker uppkommer från förångning av elektrolyten, och/eller produkter från nedbrytning av elektrolyten samt övriga material inuti cellen [19]. Denna gas är brännbar och kan antändas via exempelvis gnistor eller varma ytor [19] [25]. Genom uppvärmning av elektrolyten kan den även självantända vid temperaturer kring 450 °C [19]. Den brinner

då med liknande egenskaper som bensin eller LPG [26]. Genom den värmen som frigets vid termisk rusning kan propagering ske till angränsande celler vilket ökar produktionen av brännbara gaser. Det är även värt att notera att vid upphettning av framförallt katoden frigörs syre vilket i viss mån medför att förbränning kan fortgå i en annars ventilationskontrollerad miljö, dock med en minskad effekt [6].

Maloney [28] beskriver försök som genomfördes på tryckavlastning från Li-jonbatterier, Litium-kobolt-oxid (LCO) 18650, där rökens egenskaper undersöktes. För en mer heltäckande bild gjordes även tester med olika laddningsgrad på batterierna. Försöken gjordes genom att i en inert miljö, vid 10 psia tryck ($\approx 0,7$ atm), orsaka termisk rusning genom uppvärmning och följaktligen tryckavlastning varpå rökgaserna togs tillvara för vidare analys. Från försöken beräknades den nedre brännbarhetsgräns med Le Chatelier's formel, se Figur 2. Resultatet från försöken med olika laddningsgrader visade att en högre laddningsgrad resulterade i en större koncentration av ämnen med lägre molekylvikt, som vätgas, metan, eten, men även att en större volym gaser bildades. Den övre brännbarhetsgränsen varierade mellan 35 – 45% för laddningsgrad 50% respektive 100%. Slutligen drog författaren slutsatsen att vid högre laddningsgrad produceras större volymer gas, som även är av en mer brännbar komposition och gasen har ett brännbarhetsområde mellan koncentrationerna 10% till 35 – 45% beroende på laddningsgrad. Vid laddningsgrader mellan 40 – 100% var det undre brännbarhetsområdet relativt konstant, Figur 2. Det uträttades även ett test gällande explosivitet där ett 10,8 m³ stort rum fylldes med gas från 400 ventilerande battericeller varpå antändning genomfördes. Vid antändning registrerades ett tryck på 29 psi (≈ 2 atm övertryck). Tryckändringen mättes med mätinstrument med en frekvens på 1 Hz, så tryckökningen kan varit momentant större.



Figur 2 Den beräknade undre brännbarhetsgränsen för olika laddningsgrader. Publicerad med tillstånd av författaren [28].

Ribièrè m.fl. [29] studerade brandförloppen för olika laddningsgrader och skillnader mellan brandförloppen. För laddningsgrader på 100% erhöles en högre maximal effekt, cirka 21 kW, medan för 0% blev effekten lägre, cirka 2,6 kW. Brandförloppet hade vissa skillnader beroende på de olika laddningsgrader, dock förblev den totala massan avbrunnet material ungefär detsamma. Högre laddningsgrad medförde även ett kortare brandförlopp men med sämre förbränningseffektiviteten än de lägre laddningsgraderna.

Effekten per kvadratmeter, för denna uppställning, beräknades för att kunna jämföra med andra bränslen, varpå det visade sig att vid 100% laddningsgrad erhöles en effekt som var lite lägre än för bensin.

Ping m.fl. [30] gjorde brandförsök gällande Li-jonbatterier som bestod utav fem identiska celler, där antändning orsakades genom värmestrålning varpå brandens beteende och utveckling studerades. Brandförloppet karakteriserades av: expansion av battericellerna vilket resulterade i tryckavlastning och jetflamma. När övertrycket väl minskat avtog jetflamman och övergick till en stabil förbränning. Beteendet med alternering mellan jetflamma följt av stabil förbränning upprepades sedan tre gånger för en laddningsgrad på 100%. Den första jetflamman avgav mindre effekt än de efterföljande två jetflammorna. Effekten beräknades genom mätning av mängden syrgas i rökgaserna för att se mängden som förbrukats men på grund av att katoden avger syrgas vid höjda temperaturer, gjordes en korrigering i den totala avgivna energin. Vid 100% laddningsgrad var den totala avgivna energin 18 195 kJ och bidraget från katoden beräknades genom viktprocent till 291 kJ.

3.3.2 Toxicitet

Bergström m.fl. [31] gjorde en undersökning där målsättningen var att identifiera vilka hälsovådliga risker som människor utsätts för vid exponering av gaser som bildas under termisk rusning om antändning uteblir. De batterier som användes var Li-jonbatterier av strukturen pås-celler. Det genomfördes fyra försök på två olika katodkemier, LFP och NMC. Den experimentella proceduren gick till genom att värma en Li-jonbatteri-cell i en metallåda tills termisk rusning påbörjas. Uppvärmningen gjordes med en elektrisk värmare. För att förhindra antändning av gaserna sänktes syrehalten till under 15% genom att tillföra kvävgas. Det tillfördes vatten till kvävgasen för att mer efterlikna fukthalten i ett mer vardagligt klimat. Vid analys av gaserna erhöles att vissa av de ämnen som bildas har toxiska egenskaper varav vissa kan absorberas via huden medan andra kan orsaka irritation på andningsvägar och ögon. Det påvisades även förekomsten av metalliska aerosoler i gaserna vid tryckavlastning där mängden litium översteg korttidsgränsvärdet som Arbetsmiljöverket angivit.

Ribièrè m.fl. [29] genomförde brandförsök på Li-jonbatterier med strukturen pås-celler och katodkemin Litium-Mangan-Oxid (LMO), där brandeffekt och vissa ämnen i rökgasen analyserades. Gällande toxicitet från brandgaserna visade försöken att gasens komposition varierade med laddningsgrad. De gaser som analyserades vid försöken var CO₂, CO, THC, NO, SO₂, HCl och HF. Gemensamt för de olika ämnena var att vid laddningsgrad 100% så erhöles ett högre pik-värde, trots att den kumulativa mängden kunde bli mindre än för de andra laddningsgraderna. Vid laddningsgraden 0% erhöles störst produktion av HF, medan HCl var opåverkad av laddningsgrad. Genom att studera molekylerna i rökgaserna och avgiven energi drog författarna slutsatsen att ett fulladdat batteri erhöles lägst förbränningseffektivitet.

Toxiciteten hos de ventilerande gaserna beror på flertalet olika faktorer, bland annat laddningsgrad och vilken katodkemi som batteriet är uppbyggt utav, men även avsaknad av förbränning brukar medföra mer toxiska rökgaser [2]. I gengäld kommer rökgaserna som bildas vid förbränning att, till störst del, bestå utav förbränningsprodukter [6]. När det kommer till toxiska aspekter är det inte enbart luftburna kemikalier som utgör ett hot mot människor och miljö. Släckning av Li-jonbatterier sker via kylning av batteriets

celler och kan behöva stora mängder släckmedel som blir förorenat av toxiska ämnen [18].

Long Jr m.fl. [7] gjorde tester på släckmedlet som användes vid släckningsmomenten, för att kunna se koncentrationerna och förekomsten av olika ämnen i släckmedlet. Under försöken togs två vattenprover på de tester som författarna bedömde ge upphov till mest föroreningar. Utifrån analysen av släckvattnet, och kontrollprovet, påvisades att släckmedlet innehöll förhöjda halter av organiska ämnen, klor, fluor och metaller.

4 Gruvor

Hansen [32] beskriver inledningsvis i rapporten om gruvors generella utformning och förekomsten av fordon. En gruva består utav olika ramper och orter som ofta sammankopplas utan avskiljande barriärer. Majoriteten av ytorna i gruvan är av obrännbar natur, men lokalt placerade depåer med brännbart material förekommer. I en gruva förekommer fordon av många slag som är utspridda i stora delar av gruvan. Dessa fordon utsätts för hårda och tuffa arbetsmiljöer vilket visar sig bland annat genom det mekaniska slitaget som uppstår på däck, slangar och elektronik. Fordonen som finns i en gruva medför olika riskbilder beroende på förekomsten, och mängden, av brännbara ämnen som fordonet är uppbyggt utav, dock är det möjligt att definiera vanligt förekommande ämnen såsom diesel, hydraulolja, hydraulslangar och däck.

Vid samtal med Bäckman [12] diskuterades bland annat gruvors generella utseende och förekomsten av en mängd olika fordon. Gruvorna beskrevs som ett komplext underjordiskt nätverk av olika ramper, orter och schakt, men att det även kan finnas utsprängda utrymmen som exempelvis verkstäder. I en gruva förekommer många olika sorters fordon och arbetsmiljön för fordon är ofta av hård natur då fordonen används i fuktiga och korrosiva miljöer. Som belysning i gruvor kan det ibland vara aktuellt med enbart fordonets strålkastare och personburna gruvlampor. Detta eftersom det nödvändigtvis inte behöver finnas någon fast installerad belysning i alla orter eller ramper. Tillgången på fast belysning varierar men belysning kan finnas för mer centrala vägar och för utrymmen som används regelbundet, som i verkstäder, krossar, förråd, etcetera.

Ett stort problem när det kommer till underjordiska utrymmen är toxiciteten hos brandgaserna eftersom människor riskeras att exponeras av brandgaser beroende på vilken skiktbildning som uppstår [33]. Ventilationen i gruvorten ska dimensioneras så att dräglig luftkvalitet uppnås i vistelsezonen [1] och har således ingen avsedd funktion att hantera brandgaser. Det ska även nämnas att ventilationen har en viktig funktion i det avseende att hantera och ventilerar bort hälsovådliga spränggaser på ett effektivt sätt [12]. Dagens gruvor har vuxit i storlek och följaktligen i komplexitet vilket resulterar i svårigheter med att påverka rökens spridning via regleringar i ventilationen, vilket är ett viktigt verktyg vid räddningsinsatser [34]. På grund av att ventilationen avser vistelsezonen kan det förekomma strömningshastigheter närmare tilluften på 3 – 4 m/s, vilket kan orsaka snabb brandgasspridning, vilket oftast ses som den största riskfaktorn för människor i gruvmiljö [35]. Utöver rökgasspridning kan vindhastigheter även påverka effekten på en brand. Vid låg eller ingen vindhastighet kan effekten på en brand minskas och till och med självslockna. Om materialet har låg porositet med stor mantelarea kan en vindhastighet på 3 m/s resultera i att brandeffekten fördubblas, vilket påvisades genom modellförsök av Lönnermark & Ingason där träregelverk användes som bränsle [36].

Arbetsmiljöverket har gett ut paragrafer som ska uppfyllas för acceptabel säkerhet i gruvor. De skydd som ska finnas i en gruva är: utrymningslarm, två utrymningsvägar eller räddningskammare, skriftlig handlingsplan över personal och var de befinner sig och brandbekämpningsutrustning på fordon [1]. Utöver detta finns även ett dokument som GRAMKO [35] har upprättat som innehåller samlade råd och anvisningar gällande

brandskydd i gruvor. I denna text anges att en räddningskammare ska finnas vid behov och ha en luftmängd som varar i minst 8 timmar.

4.1 Statistik för bränder i gruvor

Hansen [37] gjorde en studie av inrapporterade bränder gällande bränder i fordon och är baserade på samlade rapporter mellan 1988 – 2010. Under denna tidsperiod rapporterades 410 brandrelaterade incidenter, varav 58 involverar elektriskt drivna lastmaskiner. Det vanligaste brandförloppet var att branden enbart involverade startobjektet utan vidare spridning. De två vanligaste brandorsakerna var elektriskt fel (171) följt av brännbara vätskor på heta ytor (99). Den i särklass vanligaste orsaken till elektriskt fel var kortslutning genom fel på elkabeln, medan för brännbara vätskor var de vanligaste antändningsytorna avgassystem, bromsar, motor och turbo. Det poängterades även att antändning av brännbara vätskor inträffar även vid användning av elektiska lastmaskiner. Det är även värt att notera att detektion av brand var genom personal i samtliga fall.

I årsrapporten 2015 sammanställt av GRAMKO [38] rapporterades 71 brandtillbud, varav 32 var fordonsrelaterade bränder. Den vanligaste brandorsaken var el-relaterad följt av överhettning/het yta. I årsrapporten 2016 sammanställt av GRAMKO [39] rapporterades 83 brandtillbud, varav 46 var fordonsrelaterade bränder. Den vanligaste brandorsaken var överhettning/het yta följt av el-relaterade bränder. Fordonsrelaterade bränder utgör historiskt cirka 50%31% av brandtillbud

I sin rapport sammanställde De Rosa [40] brandtillbud i USA, mellan 1990 – 2001, där det inträffade sammanlagt 65 bränder i gruvor under mark, exkluderat kolgruvor. Den vanligaste tändningskällan är hydraulolja eller bränsle på heta ytor och orsakade 16 bränder. Utav dessa 16 resulterade 13 i en stor brand på grund av funktionsfel på maskin och ledningar som skulle förhindra vidare flöde av brännbara vätskor. Den vanligaste metoden för detektering av brand var genom gruvarbetare som noterade rök.

Olycksstatistik som särskilt analyserar inblandade fordons eldrift har inte funnits att tillgå utan statistiken ovan innefattar samtliga fordonstyper och bränslen.

4.2 Brandförlopp och rökspridning

Ett brandförlopp i ett mer omslutet utrymme, som en gruva eller tunnel, kommer medföra vissa skillnader gentemot en fritt stående brand. En brand i ett omslutande utrymme kan få högre effekt på grund av återstrålning från de omgivande materialen, men det kan också medföra begränsningar i syretillförseln vilket kan leda till en ventilations-kontrollerad brand [41]. Ett typiskt fordon som används i gruvor innehåller brännbart material i form av både slangar, hydraulolja, stora gummidäck och diesel [42]. Utav de tidigare nämnda materialen har försök visat att det föremål som har störst enskild inverkan på brandeffekten är däcken när det kommer till stora arbetsfordon [43].

4.2.1 Brandförlopp

Hansen [44] skriver om hur, till skillnad från en vanlig byggnad, hela brandförloppet är av vikt när det kommer till gruvor. Brandens utveckling i det tidiga skedet som effekt, storlek, tillväxthastighet och position är viktigt att ta i beaktande ur ett

utrymningsperspektiv. Nästa fas för brandens utveckling är övertändning, vilket är sällsynt för gruvor på grund av de obrännbara ytskikten. Det kan dock inträffa i mer stängda utrymmen som exempelvis kontor. Den fullt utvecklade branden kan medföra att branden sprider sig till närliggande föremål och har stor rökproduktion. Slutligen, avsvlnadsfasen innebär att branden minskar i intensitet och kännetecknas av en mer långvarig rökutveckling. När det kommer till varaktigheten för en brand varierar längden beroende på om branden blir ventilationskontrollerad eller bränslekontrollerad. I en gruva med obrännbara ytskikt sprider sig branden sällan till angränsande föremål.

Gällande brandförlopp i en gruva skriver Hansen [45] att brandförloppet för ett fordon kommer att ha olika utveckling och rökproduktion beroende på materialet som brinner och mängden brännbart material, vilket varierar för olika fordonstyper. Lastmaskiner kan karaktäriseras genom mycket stora däck, vilka kan väga flera ton. Fordon i en gruva innehåller ofta stora mängder brännbara vätskor, där vätskorna vid antändning har en snabb tillväxthastighet och ansenlig rökproduktion. Utöver däck och brännbara vätskor finns även hydraulslangar som vid antändning kan medföra långa brandförlopp och stor rökproduktion. Kombinationen av snabbt tillväxande bränder och långvariga bränder där båda har stor rökproduktion utgör risker för anställda vid självutrymning, men även i räddningskammare. Utvecklingen av en brand i en gruva skiljer sig åt beroende på vindhastighet och position i gruvan. Vid genomströmning av luft kan branden lutas och kan medföra en ökad spridningshastighet till närliggande brännbara föremål, men även en högre effektutveckling genom inblandning av syre. Om branden istället inträffar vid stoffen kan inerta brandgaser kylas och återcirkulera till branden som succesivt kommer minskas i intensitet och slutligen självslockna. Även avståndet mellan bränslet och taket kan påverka flammans utseende. Vid låg takhöjd kan flammen spridas längs taket och rökgaslagrets temperatur öka jämfört med höga takhöjder.

Ett kabelbundet fordon skiljer sig från både dieseldrivna och batteridrivna fordon i det avseendet att det trådbundna fordon inte medhar något bränslepaket utan den energi som krävs försörjs från elnätet. Detta försörjningssystem kan resultera i el-relaterade bränder i matarkabeln, vilket har en förhållandevis långsam tillväxthastighet på branden och i många fall självslocknar vid bruten ström [37].

Som tidigare nämnt kan ett Li-jonbatteri nå termisk rusning och ventileras ut gaser som är antändningsbara i kontakt med heta ytor eller gnistor. På grund av att tryckavlastningen från batteriets celler uppkommer genom övertryck kommer flammen resultera i en jetdriven flamma [30], men om antändning uteblir och gaser ackumuleras kan en explosiv atmosfär uppstå. Mängden gaser som bildas vid ventilering påverkas också av laddningsgrad, där försök gjorda på 18650 LCO celler med en laddningsgrad på 100% kunde avge cirka 8 liter gaser vid 10 psia tryck, medan 10% laddningsgrad producerade cirka 1 liter [28].

Colella m.fl. [46] sammanställde olika resultat gällande faror med Li-jonbatterier¹, där det även nämndes olika kemiska aspekter gällande ventilering. Vid försök utträttade i atmosfärstryck och 27 °C, studerades vilken volym som ventilerades ut vid tryckavlastning från celler i termisk rusning. Testet utträttades för tre olika laddningsgrader och resultatet presenteras i Tabell 4-1. Den volym som bildades varierade med laddningsgrad och ju högre laddningsgrad, ju mer gaser bildades.

¹ Elektrokemiska egenskaper för batteriet 7,7 Wh 2,1 Ah 3,7V gjorda med pås-celler med LCO-katod

Författarna poängterade särskilt att för stora batteripaket kan volymen ventilerande gaser bli påtaglig. Från de sammanställda resultaten från testerna påvisades även skillnader i volymfraktionerna av olika ämnen i gaserna men även mindre skillnader för den övre brännbarhetsgränsen. Författarna poängterade även att de ventilerade gasernas förbränningsbeteende påminner om vanliga kolväteföreningar, dock med ett bredare brännbarhetsområde. Gällande volymfraktionerna för CO och CO₂ uppstod skillnader, medan volymfraktionen för vätgas var relativt konstant vid de olika laddningsgraderna, kring 30 vol%.

Tabell 4-1 Sammanställning av markanta skillnader från [46].

Laddningsgrad	50%	100%	150%
Volym ventilerade gaser [liter]	0,8	2,5	6,0
Volym ventilerade gaser per Wh [liter/Wh]	0,1	0,33	0,78
Undre brännbarhetsgräns [%]		6	6
Övre brännbarhetsgräns [%]		38	40
Volymfraktion CO [volym%]	3,61	22,9	24,5
Volymfraktion CO ₂ [volym%]	32,3	30,0	20,9

4.2.2 Rökspridning

Gehandler & Ingason [47] beskriver ventilationens inverkan på brandförlopp i undermarksmiljö. Beroende på en tunnels utformning och ventilationssystem kommer röken, men även branden, att få olika beteenden. Flödeshastigheten av luften kommer påverka hur en brand, med samma effekt, kan ge upphov till olika mycket skiktbildning mellan varma brandgaser och den ursprungliga luften. Vid större värden på flödeshastigheten kommer inblandningen av kall luft att vara större i rökplymen, vilket resulterar i mindre skiktbildning nedströms branden. Branden kan i gengäld frångå vertikalt led och orsaka större synfaktor mot omkringliggande material. I tunnlar som har öppna ändar och kontinuerligt genomströmmande luft, kan medföra att brandeffekten ökar jämfört med en fritt stående brand. Om en utav ändarna är slutna kommer brandens rökgaser att återcirkulera till branden när de når den döda änden, och ge upphov till minskad effekt och eventuellt kvävs branden. Återcirkulation kan även inträffa vid låga flödeshastigheter om orten är horisontell, eller har en lutning, men är tillräckligt lång så att brandgaserna hinner kylas och tappa sin stigkraft.

Hansen [32] skriver om hur branden och röken påverkas av den omslutande miljön i en gruva medför. Vid brand i en gruva bildas ett varmt lager med rök som succesivt kommer kylas från det omgivande bergmaterialet i takt med ökat avstånd från branden. Ortens storlek kommer påverka brandens möjlighet att spridas, men även brandens beteende. Vid en ort med smalare karaktär kommer det att bildas ett varmare rökgaslager och en låg takhöjd kan medföra att flamman slår i taket och sprids radiellt längs taket. Båda dessa fall kommer medföra en större återstrålning som påverkar brandförloppet. Närmare branden kommer det att ske en uppvärmning av det omslutande bergmaterialet vilket även detta kommer medföra en återstrålning mot fordonet. Ventilationen är en faktor som påverkar brandförloppet genom att luftens hastighet medför en omblandning

av syre och förbränningsgaser vilket förbättrar förbränningseffektiviteten. På grund av förekomsten av stora mängder luft kombinerat med ventilationen kommer branden sannolikt bli bränslekontrollerad.

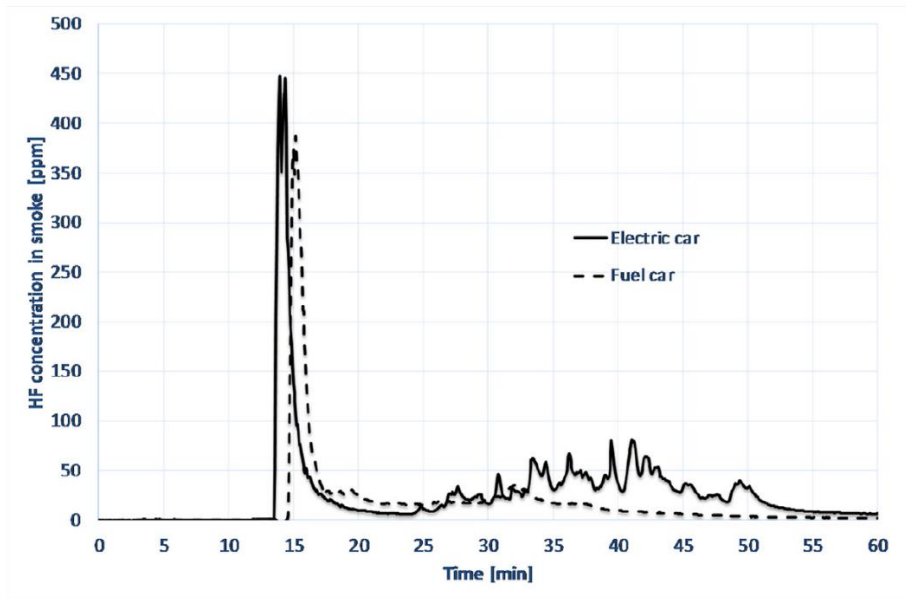
Hansen [48] skriver om rökspridning i gruvor, men även olika beräkningsmetoder gällande rökspridning för bränder med traditionella bränslen. Vid en brand i en gruva kommer rökgaslagret, närmast branden, att ge upphov till två lager, ett med brandgaser och ett med vanlig luft. Ventilationens strömningshastighet är en faktor som påverkar förekomsten av lagerbildning, där en högre hastighet medför en mer omblandad miljö. Längre ut från branden kommer brandgaserna att kylas och tappa sin stigkraft och tillslut fylla hela gruvorten med brandgaser. Vid brand värms luften upp vilket medför en volymökning. Detta kan leda till två händelser, *throttle effect* och *buoyancy effect* (skorstenseffekt). *Throttle effect* medför att från-ventilationen inte klarar av att transportera ut rökgasvolymerna så att flödet in till utrymmet upphör. Skorstenseffekt kan arbeta med eller emot ventilationen. Detta fenomen uppkommer vid en brand i ett lutande utrymme. Vid luftströmmar uppför lutningen kommer stigkraften från brandgaserna att följa luftströmmen, motsatsen sker dock om ventilationen är i motsatt riktning, nedför lutningen, varpå konflikt mellan luftströmmar och stigkraft uppkommer. Trots förekomsten av ventilation kan brandgaserna strömma mot ventilationsriktningen, vilket kallas återströmning.

5 Skillnader mellan fordon med förbränningsmotor och elfordon

5.1 Toxicitet

Lecocq m.fl. [49] genomförde försök gällande fullskaliga brandförsök med både batteridrivna bilar och dieseldrivna bilar från två olika tillverkare där brandgaserna analyserades. De kemiska ämnen som analyserades var CO, CO₂, NO, NO₂, HCl, HCN, HF och kolväten. Vid analys av de rökgaser som producerades vid försöken uppkom inga större skillnader mellan de olika drivsystemen, förutom gällande HF. I det tidiga skedet av branden såg HF-produktionen liknande ut från de olika fordonen. I det senare skedet skiljer sig dock produktionen av HF. Den batteridrivna bilen får flertalet toppar i mätdata som sammanlänkas med förbränning av Li-jonbatteriet. Dessa toppar medför att den ackumulerade mängden HF blir större för den batteridrivna bilen.

Truchot m.fl. [33] gjorde fullskaliga experiment gällande fordonen där röken studerades för olika toxiska ämnen. De ämnen som studerades var HCl, HF, HCN, CO₂, CO, NO, NO₂, SO₂ och kolväten. Experimenten utträttades i en miljö med god ventilation på fyra olika bilar, av vilka en var driven med elektricitet. Antändning åstadkoms genom extern flamma mot säte eller med pölbrand vid höger framhjul. Brandgaserna analyserades varpå resultatet presenteras i procentuella andelar från den totala mängden brandgaser. Brandgaserna hade snarlika fördelningar utav de olika ämnena, förutom just HF som producerades i större mängd, se Figur 3. Vid mätningen av koncentrationen för HF och HCl uppkom en skarp pik cirka 15 minuter in i brandförloppet för respektive ämne och för båda bränslesorterna, HF-koncentrationen var dock högre för elfordonet. Genom att koncentrationerna ökade kraftigt orsakade detta att *Fractional Effective Concentration* (FEC-)värdet momentant översteg 1 – vilket är det värde som motsvarar 50% av de evakuerande, vid exponering, inte längre är förmögna att utrymma. För *Fractional Effective Dose* (FED-)värdet, den ackumulerade mängden farliga ämnen, erhöles ett lägre värde för elfordonet. Författarna drog slutsatsen, från de gjorda uppskattningarna av toxiciteten hos brandgaserna, att elfordon inte medför enorma skillnader mot traditionella bränslen gällande toxicitet. Det poängterades också att den skillnad som finns angående produktion av HF uppkommer först när batteriet blir inblandat i branden vilket inträffar efter 30 minuters brandförlopp och bör således inte påverka utrymningen.



Figur 3 Jämförelse mellan förbränningsmotor och elfordon angående mängden HF som produceras. Publicerad med tillstånd av författaren[33].

5.2 Fullskaliga brandförsök

Lecocq m.fl. [49] gjorde fullskaliga experiment gällande brandförloppet för elfordon och fordon med förbränningsmotorer. Fordonen som användes vid försöken var av liknande storlek och gjordes för två olika bilstorlekar. De fordon som försöket utfördes på var fulltankade, diesel, respektive fulladdade, Li-jonbatteri. Branden initierades genom en gasolbrännare i kupén och fick sedan spridas till full brand. För en sammanställning av samlade mätdata från experimenten se Tabell 5-1.

Författarna poängterar särskilt hur stor inverkan batterikemi, förpackningsätt och metod för antändning har för brandförloppet gällande elfordon. Författarna skriver att antändningen av Li-jonbatteriet inträffade cirka 35 minuter efter antändning, varpå mindre toppar i effektutveckling, som beräknas med O_2 -konsumtion, kan utläsas. Detta påpekades enbart för brandförloppet för elfordon 1. Utseendet för effektkurvorna som beräknades för respektive fordonskategori 1 hade ett snarlikt utseende gällande brandförloppets tid och maximal effekt. Störst skillnad var mellan elfordon 2 och dieselfordon 2, där diesel hade en högre maximal effekt, men liknande längd på brandförloppet.

Tabell 5-1 Specifikation över fordon och samlade mätdata [49].

	Elfordon 1	Dieselfordon 1	Elfordon 2	Dieselfordon 2
Maximal effekt [MW]	4,2	4,5	4,7	6,1
Total avgiven energi [MJ]	6300	6900	8500	10 000
Massa [kg]	1122	1128	1501	1404
Avbrunnen massa [kg]	212	192	278,5	275
Avbrunnen massa [%]	19	17	18,6	19,6
Totala massan gaser ² [g]	477 641	526 184	637 717	745 381
Elektrisk spänning [V]	330		355	
Kapacitet [Ah]	50		66,6	
Energi [kWh]	16,5		23,5	

Watanabe m.fl. [50] utträttade fullskaliga brandförsök med en elbil, Nissan Leaf, och en bensinbil, Honda Fit. Försöken studerade effekten, brandförloppet och förbränningsvärme. Antändning initierades genom alkoholhaltig gel antändes vid vänster bakhjul. Effekt och total avgiven energi beräknades genom mängden avbrunnen massa multiplicerades med ett värmevärde som var gemensamt för båda fordonen, 22 MJ/kg. Specifikation över fordon och resultat kan ses i Tabell 5-2.

Tabell 5-2 Specifikation över Nissan Leaf (elfordon) och Honda Fit (bensinfordon) och samlade mätdata, sammanställd ur [50]

	Bensinfordon (2003)	Elfordon (2011)
Maximal effekt [MW]	2,1	6,3
Total avgiven energi [MJ]	4300	6400
Massa [kg]	1275	1520
Laddningsgrad [%]		100
Bränsle [liter]	10	
Elektrisk spänning [V]		360
Energi [kWh]		24

Watanabe m.fl. [50] fortsätter beskriva brandförloppet och efter 37 minuter noterades en jetflamma, vilken varade i drygt en minut, som författarna misstänker kommer från ventilering av Li-jonbatteriet. Vid 40 minuter sprack den främre vindrutan och förbränning av kupén samt elektrolyten gav upphov till den maximala effekten på 6,3 MW. Från undersidan av bilen kunde flertalet tryckavlastningar detekteras. Mängden

² Den summerade massan av de analyserade ämnena som brandgaserna innehöll.

bensin som fanns i bilen misstänkts ha förångats och läckt ut genom avbrunna bränsleledningar varpå antändning inträffade.

Hansen & Ingason [42] [51] genomförde två fullskaliga brandförsök med två typer av gruvfordon, en lastmaskin och en borrhög, i en gruva med möjlighet till genomströmning av luft. Försöken utträttades i avseende att öka kunskapen om bränder i gruvfordon. Bränderna initierades genom att efterlikna en pölbrand under fordonen, där delar utav bränslet tömdes i en behållare som var placerad under fordonet. Lastmaskinens bränsle bestod till stor del utav däck vilket medförde att brandförloppet blev utdraget och den kvarvarande glödbranden släcktes efter 5 timmar och 23 minuter. Den maximala effekten för lastmaskinen blev 15,9 MW och inträffade när pölbranden och båda bakdäcken brann, vid 11 minuter efter antändning. När bränslet i pölbranden tog slut, vid 18 minuters brandförlopp, minskades effekten plötsligt från cirka 13 MW till 5 MW. Detta följdes sedan av flamspridning på däckens yta som bidrog till en ökning av effektutveckling till cirka 10 MW. Dieselpölbrandens effekt beräknades för data gällande fritt stående brand till 1,26 MW, varpå författarna resonerade att den stora ökningen i effekt kan komma från att det kvarvarande bränslet i tanken läcktes ut och ökade arean för dieselpölen, påverkan av longitudinell vind samt även återstrålningen från omgivande objekt till dieselpölen kan ha haft en inverkan. Effekten för ett utav lastmaskinens däck som exponeras för longitudinell vind, ökar effekten med en faktor 2 och beräknades till cirka 6,5 MW. Den senare delen av brandförloppet påverkades framförallt av däcken, varpå effekten minskades i takt med branden i däcken minskade i intensitet.

Vidare skriver Hansen & Ingason [42] [51] att när det kommer till brandförloppet gällande borrhögen, var brandförloppet kortare och mätningarna upphörde efter 2 timmar och 25 minuter. Vid brandens maximala effekt, efter 21 minuters brandförlopp, hade dieselpölen brunnit ut och branden bestod således av däck, hydraulslangar, hydraulolja, hytt och elkablar. Den maximala effekten beräknades genom syrgaskoncentrationen i rökgaser till 29,4 MW. Med tidigare mätningar på hydraulslangar i konkalorimeter och longitudinell vindpåverkan, kunde effekten från hydraulslangarna uppskattas till 11,2 MW. Effekten från däcken baserades på effekt per kvadratmeter och vindens påverkan och beräknades till 1,5 MW per däck. Genom att summera effekten från däck och hydraulslangar kunde bidraget från hytt, hydraulolja samt elkablar uppskattas till 11,8 MW.

Truchot m.fl. skriver att förekomsten av ett batteri som energiförvaring inte påverkar effektutvecklingen för fordonet i sin helhet vid en brand [33]. Lebkowski skriver att utvecklingen av en brand verkar långsammare för elfordon än vanliga förbränningsfordon [52].

I tabellen nedan, Tabell 5-3, återfinns samlade maxeffekter på fullskaliga försök som har genomförts för att få en överblick om hur effektutvecklingen gällande elfordon står sig i förhållande till förbränningsmotorer.

Tabell 5-3 Sammanställning av maximala effekter uppmätta genom försök med fullskaliga fordon.

Fordonstyp	Effekt [MW]	Tillverkningsår	Källa
Personbil, diesel alt. bensin	4,9 – 7,8	Utan årtal	[33]
	4,5 – 6,1	Utan årtal	[49]
	2,1 ³	2003	[50]
	1,5 – 2	Slutet av 1970-talet	[53]
	1,7 – 8,5	Utan årtal	[53]
	1,5 – 8,5	1970 - 1995	[54]
	3,5 ⁴	1998	[55]
Buss, diesel	29 – 30	Utan årtal	[53]
	25 – 34	Utan årtal	[54]
Lastbil, diesel	25 – 203 ⁵	Utan årtal	[53]
	14 – 202 ⁶	Utan årtal	[54]
Gruvmaskiner, diesel	15,9 – 29,4	Utan årtal	[42]
Personbil, Li-jonbatteri	4,5	Utan årtal	[33]
	4,2 – 4,7	Utan årtal	[49]
	6,3	2011	[50]

Long Jr m.fl. [7] gjorde ett fullskaligt försök med antändning av ett Li-jonbatteripack som används för elfordon. Batteriet var av storleken 16 kWh och antändning orsakades med gasolbrännare under hela batteriet. Den maximala effekten som erhöles var cirka 700 kW, dock ska det noteras att gasolbrännarna stod för 400 kW utav dessa. Således bidrog Li-jonbatteriet med 300 kW.

³ Försöket gjordes med 10 liter bränsle.

⁴ Försöket gjordes utan bränsle, batteri, air-bags, bältesspännare och gasfjädrar till motorhuv.

⁵ Effekten påverkas utav vilket material som lastbilen är lastad med.

⁶ Effekten påverkas utav vilket material som lastbilen är lastad med.

6 Detektion av termisk rusning

Om ventilerings sker utan antändning, exempelvis vid intern kortslutning eller haveri från laddning, kan ackumulering av rökgaser leda till en explosion [6]. Enligt Feng m.fl. är det mycket viktigt med tidiga detektionssystem [56].

Larsson [57] skriver om hur detektion av pågående eller uppkommande fel kan detekteras. Dels genom gasdetektering, men dels genom temperaturregistrering från batteriets celler. Vid ventilerings bildas ett utsläpp av gaser, varpå gassensorer kan detektera förekomsten av kolväten i luften. Från försök gjorda av Larsson visades att vid ventilerings av gaser sjönk medeltemperaturen fort på cellens yta, varpå en kraftig temperaturökning efterföljde när termisk rusning tog plats. Genom att mäta yttemperaturen för varje cell skulle tryckavlastning kunna detekteras. Det poängteras dock att dagens batterier inte har en temperaturmätare per cell. En modul kan innehålla 20 celler, vilket gör att denna detektionsmetoden kan bli fördröjd för dagens batterier.

Larsson & Mellander [58] nämner att detektionen av uppkommande termisk rusning är viktig, men problematisk och ska i huvudsak åstadkommas via befintligt BMS. Genom att mäta temperaturen på varje cell ges ett komplext system med många mätpunkter och vid fel på sensor eller BMS går inte temperaturändringen att detektera. När det kommer till gasdetektorer rekommenderas att använda dubbla gassensorer vilka kan användas för att detektera kolväten, från förångad elektrolyt, och även toxiska gaser.

7 Experiment med släckning av batterier

Maloney [59] gjorde experiment på Li-jonbatterier för att se hur olika släckmedel kunde förhindra termisk rusning och propagering mellan celler. De släckmedel som användes var både vatten, vattenbaserade med tillsatser samt gassläcksystem. Testen var uppdelade i två separata försök. Den första delen gick ut på att registrera vilken kylande effekt som släckmedlet orsakade på en uppvärmd aluminiumplatta. Vid försöket med den uppvärmda aluminiumplattan blev resultatet att de vattenbaserade släckmedlen har en högre kylande effekt än släckmedlen i gasfas. Vidare, för de vattenbaserade släckmedlen, erhöles en större kylande effekt när större volymer tillfördes. Detta var dock inte fallet för icke-vattenbaserade, som enbart gav en minimal ökning. Den andra delen av försöket bestod av hur effektiva de olika släckmedlen förhindrade propagering mellan olika celler. Från experimenten visade det sig att de vattenbaserade släckmedlen lyckades förhindra propagering mellan celler. För samtliga släckmedel i gasfas var inte den kylande effekten tillräcklig, vilket ledde till att propagering inträffade mellan cellerna.

Egelhaaf m.fl. [60] genomförde experiment gällande brandbeteende och släckning av bränder i Li-jonbatterier. Vid testet användes tre olika släckmedel, ett med enbart vatten och två med vatten och olika tillsatser. Uppvärmning och antändning av batteriet orsakades av en pölbrand med n-heptan som fick brinna ut. När det enbart var batteriet som brann, gjordes den visuella observationen att det var avsevärt mindre brandrök än vad som produceras vid brinnande diesel eller bensin. Släckningen gjordes med syftet att förbruka så lite släckmedel som möjligt men samtidigt förhindra återantändning. Samtliga släckmedel åstadkom samma resultat, dock minskades vattenmängden vid användning av tillsatser. När släckmedel tillfördes och släckte flammorna på det brinnande Li-jonbatteriet ökade rökproduktionen och stora mängder tjock rök bildades. Efter släckinsats lagrades Li-jonbatteriet nedsänkt i det släckmedel som användes vid brandbekämpningen. Från det släckvatten och lagringsvatten som användes togs prover för vidare analys. Analysen visade att släckvattnet eller lagringsvattnet hade förekomsten av klor och fluor löst i vattnet. När enbart vatten användes uppmättes fluorhalten till 33 mg/l och klorhalten till 38 mg/l. Vid användning av tillsatser visade analys av lagringsvattnet i det ena fallet en fluorhalt på 140 mg/l och en klorhalt på 29 mg/l, medan den andra tillsatsen inte kunde analyseras på grund av inverkan från tillsatsen eller för att koncentrationerna var för låga.

Andersson m.fl. [61] studerar i rapporten om skillnaderna mellan släcksystem i hela utrymmet eller i modulen kan påverka och motverka termisk rusning. Begränsning av termisk rusning sker via tillförsel av släckmedel som har en kylande verkan på cellerna. På grund av de täta packningsmetoder och omgivande skyddshölje uppges detta vara svårt att åstadkomma, vilket resulterar i att utsidan av skyddshöljet kyls. Två tester genomfördes, släckning av hela utrymmet och släckning genom tillförsel av släckmedel direkt in i modulen. Cellen lades i en omgivande kub som skulle efterlikna en batterimodul. Gällande släckning av hela utrymmet installerades sprinkler i taket på utrymmet och tre typer testades, vattensprinkler, lågtryck vattendimma samt högtryck vattendimma. Resultatet var att släckmetoden inte hade någon märkbar kylande effekt

på de ytor som temperaturen mättes på, utan temperaturen ökade och branden fortsatte tills bränslet tog slut. Från dessa resultat drog författarna slutsatsen att släckmedlet inte lyckades nå branden. När det gäller direkt inmatning i modulförsöket placerades sprinklern inuti modulen, med lager av hålad plåt, mellan cellen och sprinklern, för att efterlikna packade celler. Detta deltest provade olika släckmedel, vatten, skum (klass A, F och CAFS), kvävgas och AVD. Majoriteten av dessa släckmedel påverkade temperaturutvecklingen och författarna drog slutsatsen att släckmedel med hög specifik värmekapacitet kan medföra en snabb kylning samt att en sänkning av ytspänning hos släckmedlet kan medföra en bättre djupträngande förmåga. Försöken med skum visade att skumkvaliteten är viktig och att tungskum har bättre kylande förmåga än lättskum. Både lättskum och gassystem kan slå ned branden, men medför begränsad kylning av celler.

Russoa m.fl. [62] utträttade släckningsförsök med olika släckmedel för Li-jonbatterier. När battericellen hade nått termisk rusning och antändning skett påbörjades släckförsöken. De släckmedel som användes var koldioxid, pulver, vatten, vattendimma och skum. Den maximala temperaturen för cellen nådde cirka 700 °C och vid användning av vatten eller skum sänktes temperaturen hastigt och släckte branden. Vattendimman hade en sämre kylande förmåga vilket resulterar i en längre tid tills temperaturen stabiliserades. Koldioxid och pulver hade minst kylande inverkan på cellen.

Hoffman [63] gjorde olika försök med Li-jonbatterier, 2,4 kWh 7Ah LFP-katod förpackade i påsstruktur, genom nedsänkning i vatten och saltvatten. Under experimenten studerades bland annat förekomsten av föroreningar i vattnet efter nedsänkning av batteri, händelseförloppet gällande batteriet samt även risken för elektrisk chock. Gällande elektrisk chock mättes spänningen till mindre än 0,5 V/meter och det bedömdes vara säkert att vara i vattnet kring batteriet, traktionsbatteriet eller spänningsförande material ska dock inte beröras. Vid nedsänkning i vanligt vatten uppstod skador på BMS, men inte på själva batteriet och strömbrytarna i batteriet öppnades. När saltvatten användes bildades klorgas och saltvattnet blev missfärgat av föroreningar, exempelvis ämnen så som zink, järn, koppar och aluminium. Batteriet hade även laddats ur fullständigt och orsakat sådan värme så att interna ledare och isolering smältes. Under de 15 minuter som batteriet nedsänkt i saltvatten laddades batteriet ur och vattnet, 400 liter, värmdes upp från 4 grader till 23 grader. Det noterades att saltvatten laddar ur batteriet, medan batterier i vanligt vatten fortfarande kan vara laddade.

Under samtal med Bäckman [12] diskuterades bland annat släckningsmetoder av batterihaveri som uppstår vid laddning. Från detta nämnde Bäckman att en tanke gällande kylning av havererande Li-jonbatteri, möjligen kunde ske genom att vattenfylla en nedsänkning där fordonet, eller Li-jonbatteriet, var placerat under pågående laddning och på så vis kyla batteriet.

Lebkowski [52] föreslog användning av släcksystem som är fastmonterade i batteriet och installerat så att släckmedel tillförs direkt in i batteriet eller dess moduler. Genom olika sorters sensorer kan släcksystemet bekämpa bränder i ett tidigt skede och öka säkerheten vid brand.

8 Räddningstjänst och personal

När det kommer till en insats kan insatsen kategoriseras som offensiv eller defensiv [64]. Utifrån dessa två alternativ definierar Kumm ett defensivt angreppssätt som valet att inte bekämpa branden och vid en offensiv insats kommer en räddningsinsats att inkludera brandbekämpning. Som tidigare nämnts dimensioneras ventilationen för en trivsam luftkvalitet i vistelsezonen. På grund av dimensioneringsmotivet av ventilationen har det gjorts att det förekommer fall då brandgaserna inte klaras av att ventileras ut utan orsakar rökfyllnad [65]. Detta kan således leda till att en offensiv räddningsinsats involverar rökdykning. Vid en rökdykning är det reglerat att en riskanalys ska genomföras för att säkerställa att räddningspersonal inte utsätts för onödiga risker [66]. Grunden för att kunna genomföra en korrekt riskbedömning kräver tillförlitlig information, vilket inte alltid är fallet på grund av den svåröverskådliga situationen [64]. När väl problemet med att nå brandens position är löst är det viktigt att ta hänsyn till hur det omkringgivande berget har exponerats för branden eftersom det kan uppstå spjälkning på grund av temperaturdifferenserna vid tillförsel av släckmedel [42].

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) föreslår att vid bränder i elfordon bör vattendimma användas för att bekämpa lågan samt att tvätta brandgaserna, med vattendimma, för att minska toxiciteten [18]. Särddqvist skriver att vattnet som användes för att tvätta ur rökgaserna kan innehålla spår från hela förbränningsprocessen.[67]. Vidare skriver Särddqvist att vid exponering av höga halter vattenånga som kommer från kylning av varma ytor, kan det medföra att skyddsutrustningen fuktas och värmas upp. Räddningsinsatser i gruvmiljöer kan vara mycket långa och i en brand i Kiruna var utrymning genomförd först efter sex timmar [68]. En brand i Kanada med Li-jonbatterier till handredskap tog nästan åtta timmar tills tillräcklig kylning uppnåddes [69].

8.1 Räddningstjänst

Kumm [64] skriver om vissa hjälpmedel som kan ha en positiv påverkan på insatsen. Dessa hjälpmedel kan vara lystråd som hjälper rökdykare att lättare hitta ut och kan användas som komplement till slangen, men även utrymmande personal kan få lättare att hitta ut. Kumm föreslår att en utredning gällande en rekogniseringsstyrka som använder en lystråd som alternativ till slang bör genomföras. På grund av att mängden luft som rökdykarna har tillgänglig i flaskorna och att bära tungt ökar förbrukningen av luft kan en transportvagn vara gynnsamt för att minska den fysiska ansträngningen.

Long Jr m.fl. [7] utträttade försök gällande släckning av Li-jonbatterier. Försöket bestod utav sex släckinsatser på två olika batteristorlekar, där vatten utan tillsatser användes genomgående. För att efterlikna mer realistiska förhållanden konstruerades en test-bil som medförde vissa restriktioner i tillgängligheten av batterierna och test-bilen stod i en fri miljö. Utifrån intervjuerna med den släckpersonal som utförde släckning råder samstämmighet om svårigheten att tillföra släckmedlet på varma punkter för att förhindra propagering. På grund av svårigheterna gällande kylning bidrar detta till att tiden för släckningsmomentet ökar vilket resulterade i att två utav tiderna för släckinsatserna översteg släckningspersonalens lufttillgång, varpå författarna rekommenderar att flera luftpaket kan behövas. Under släckinsatserna mättes

spänningen för både chassi och strålrör och bedömningen författarna gjorde var att det inte förekom några skadliga spänningar i dessa försök.

Kumm [70] skriver att vid en offensiv räddningsinsats föreligger kravet på tillgång på släckvatten om det förekommer eller finns risk för brand. Detta moment är mycket tidskrävande och påverkar rökdykarparets fronthastighet negativt. På grund av att ytskiktet är obrännbart är inte det största hotet att branden sprider sig bakåt så att reträttvägen begränsas. Kumm skriver att de dominerande risker som rökdykarna riskerar att utsättas för är: "... luftstopp, desorientering eller för hög kroppstemperatur på grund av det fysiskt ansträngande arbetet i kombination med förflyttning långa sträckor, ibland i miljöer med betydande lutning." [70, p. 26]. Ett verktyg som används för orientering vid rökdykning är värmekamera som registrerar skillnader i temperatur. Dock kan det uppstå problematik när det kommer till undermarksanläggningar där röken kyls av de omgivande materialen. När röken kyls minskar stigkraften, vilket medför att utrymmet kan bli rökfyllt och endast små temperaturdifferanser finns att utläsa. Eftersom värmekameran används för orientering, kan det leda till desorientering för rökdykarparet.

Hansen [71] har skrivit om räddningsinsatser i järnmalmsgruvor under mark och problematiken därtill. Hansen noterar särskilt att värmeexponeringen, vid inträngning i rök, vanligtvis inte är någon dominant faktor utan problemet är snarare att inträngningsvägarna i rökfyllda miljöer kan bli långa om branden har kraftig rökutveckling. Närmare branden kan höga temperaturer ge upphov till problem. Berget värms upp från branden för att sedan utsättas för ett relativt kallt släckmedel, som vatten, vilket kan ge upphov till spjälkning. För att minska rökspridningen kan avskiljande anordningar användas, men ytterligare en metod är att använda styrbar ventilation som kan påverka luftströmmarna, om möjligheten finns.

Palm [72] analyserade räddningsinsatser under mark och fann att det fanns svårigheter med att få tillförlitlig information på grund av det inte finns möjlighet att få en översikt av brandplatsen. Informationsbrist är ett stort problem eftersom tillförlitlig och aktuell information formar insatsens riktning. En insats under mark kan komma att kräva extra resurser i form av slangar, vatten och luftpaket. Vid räddningsinsatser är luftmängden och fysisk ansträngning begränsande faktorer, vilket kan förbättras genom tomma slangar.

Släckförsök med fullskaliga tester genomfördes av Palm m.fl. [73] där tid till släckning och luftförbrukning registrerades. Vid framryckningen användes olika släcksystem för att se hur räddningspersonalen påverkades av de olika systemen. Efter försöken drog författarna slutsatsen att faktorer som verkade påverka gånghastigheten var, utrustningens tyngd, hur svårt det är att navigera, friktion mellan slang och mark och missförstånd i kommunikation mellan räddningspersonal i en rökfylld miljö. Vid sista försöket användes en kärra för att transportera utrustning på, vilken visade sig vara svårmanövrerad. Detta transportsätt medförde således att det tog längst tid att nå branden och kräver övning innan tillämpning i skarpt läge. Från försöken visades även vikten av samarbete och tydliga instruktioner för respektive medlem. Författarna noterade svårigheten av inträngning längre än 75 meter när tunneln är rökfylld men även vikten av väl inövat samarbete.

MSB [18] skriver i sin rapport att skärsläckare inte bör användas vid släckning av elektriskt drivna fordon eftersom oskadade celler kan penetreras av vattenstrålen och på

så vis försätta fler celler i termisk rusning. Innan bärgning kan det vara fördelaktigt att med värmekamera se om temperaturen på utsidan av batteriet sjunker, men man ska vara medveten om att risken för återantändning finns så länge det finns energi kvar i batteriet. . Vidare rekommenderas att sänka ner det brunna batteriet i en saltlösning utomhus för att tömma batteriet på elektrisk laddning.

I en olycksundersökning av Skellefteå kommun [74] utreddes ett brandförlopp som misstänks ha börjat genom att en slang för hydraulolja sprack och dimma av hydraulolja antändes. Brandens placering resulterade i att tekniska installationer skadades och insatsen pågick i cirka fyra timmar. I utvärderingen nämndes att det kan vara svårt att skicka ner brandbilar i långa nedfarter i gruvor om lutningen är för brant, eftersom bromsarna inte är gjorda för detta ändamål. Vidare föreslås att transport med fordon inte ska ske i rökfylld miljö på grund av problematiken med att till fots återgå den körda sträckan vid händelse av fordonshaveri. Det uppstod kommunikationsfel genom att räddningstjänstens kommunikationsutrustning inte fungerade i gruvmiljön. Gruvans kommunikationsutrustning fungerade, men var svårhanterlig för räddningstjänstens personal på grund av bristande erfarenheter. Vid användandet av räddningslina nämndes att det utgjorde en trygghet för rökdykarna vid inträngning i rök utan slang. Det nämns även att tillgången till säkert vatten möjligen kan frångås eftersom omgivande material är obrännbara. Vid släckinsats ska slang naturligtvis användas.

8.2 Självutrymning

Conit [75] skriver om vikten av förberedelser gällande brand under mark och tar i beaktande de människor som på något sätt blir involverade i branden, samt lägger stor vikt på de anställda som befinner sig i gruvan. På grund av den sporadiska natur uppkomsten av en brand innebär, är det viktigt att ha en väl tränad arbetsstyrka som är medvetna om vad som ska göras och hur. Övningar bör ske så att arbetarna får praktisk erfarenhet gällande utrymning och brandbekämpning, hur och när branden kan bekämpas eller när reträtt är att föredra, vilket sedan kan kompletteras med scenariospel. För att möjliggöra navigering i rökfyllda miljöer har test med laserpekare gjorts. Testet baseras på att laserpekaren hela tiden är i rörelse, i vertikalt och horisontellt led, och prickerna enbart syns när den träffar ett föremål inom synhåll. I det test som gjordes användes en grön laserpekare för bästa möjliga synlighet och kontrast vilket utträttades i en miljö med icke irriterande rök med en sikt på 0,3 – 0,9 meter. Författaren skriver att vid genomförda experiment var laserpekaren användbar som navigeringsverktyg men att mer forskning krävs.

Ingason m.fl. [76] har skrivit om säkerhet under mark och ventilationens inverkan på såväl brandförlopp som utrymningsmöjligheterna. För att säkerheten i undermarksanläggningar ska vara acceptabel är det av stor vikt att personal har god kännedom om utrymningsplanen vid händelse av brand. Vid en brand bildas rök som kommer att påverkas av ventilationen. Ventilationen kan vara till nytta, men kan även bidra till oönskade konsekvenser. Genom att stänga av ventilationen kommer branden dels att minska i intensitet, och dels kommer inte ventilationen att påskynda rökspridning där folk kan befinna sig. Personal kan befinna sig i stora delar av undermarksanläggningen vilket medför osäkerheter i huruvida vissa delar kan tillåtas rökfyllas eller ej. Utifrån dessa osäkerheter rekommenderas det att, i de flesta fall, stänga av ventilationen i händelse av brand.

8.3 Skyddsutrustning

Thors m.fl. [77] utförde tester på skyddsutrustning och hudens upptagningsförmåga. Den skyddsutrustning som studerades är vanligt förekommande inom räddningstjänsten och används vid bland annat rökdykning. Försöken studerar genomsläppligheten av luftburna kemikalier och upptagningsförmågan via oskyddad hud. Valet av kemikalier för analys baseras på försök gjorda av Bergström m.fl. [31] där gaserna från termisk rusning i Li-jonbatterier utan antändning analyserades och identifierades. De kemikalierna som valdes var dietylkarbonat (DEC), dimetylkarbonat (DMC), 1,4-tioxan och vätefluorid (HF). De koncentrationer som användes var 1009 ppm, 1016 ppm, 1046 ppm respektive 55 ppm. Försöken visade att skyddsutrustningen hade låg motståndskraft för DEC, DMC och 1,4-tioxan. HF detekterades inte vid den oexponerade sidan. De kemikalierna som penetrerade utrustningen gjorde detta på mindre än en minuts exponeringstid. Gällande studierna av hudpenetration exponerades huden för DEC, DMC och 1,4-tioxan i vätskeform med två olika koncentrationer, 20% och 100% för respektive kemikalie. Det visade sig att penetrationsförmågan var god för samtliga kemikalierna och den kumulativa mängden var likartad för båda koncentrationerna.

Wingfors m.fl. [78] sökte få en inblick i huruvida räddningstjänstens skyddskläder erbjuder ett acceptabelt skydd mot luftburna kemikalier. För en mer heltäckande bild av skyddet mot gasformiga kemikalier kan rapporten kombineras med studier gjorda av Thors m.fl. [77]. Rapporten studerade genomsläppligheten av vätefluorid, vätecyanid, karbonylfluorid, cyklohexan och fina partiklar. De material som testades var ett begagnat och ett nytt ytterställ kombinerat med ett tillhörande underställ som erhöles från två räddningstjänster. Testmetodiken följde ett Swatch-test som är utvecklat för att testa genomsläppligheten hos ett material. Testkammaren delas in i en volym med högkoncentration, testmaterialet som en avskiljande vägg och en volym där mätningar av genomsläppligheten görs. Utifrån denna uppställning visade resultaten att båda testmaterialen hade god motståndskraft för vätefluorid och karbonylfluorid som under en 20-minutersperiod exponerades för koncentrationen 3500 ppm respektive 1000 ppm. För de övriga två ämnena klassades skyddskapaciteten på skyddskläderna som låg på grund av att den förbestämda genomsläppskoncentrationen erhöles efter tider på mindre än fyra minuter för samtliga försöken. Efter genomfört test innehöll testmaterialen HF. Vid jämförelser mellan de två olika test-ställen var resultaten snarlika och endast mindre skillnader kunde ses. Det är viktigt att poängtera att testet är utfört på en hel yta och således har inte genomsläppligheten av skarvar, sömmar eller dragkedjor tagits i beaktande.

9 Diskussion

En vanlig brandorsak är antändningsbara vätskor på heta ytor. Genom att ta bort diesel som bränsle bör risken för brännbar vätska på heta ytor minskas. För brandens utveckling och varaktighet finns fortfarande hydraulslangar och däck kvar som kan orsaka stor rökproduktion. Vid övergången till elfordon kommer behovet av ventilation att minska, men det kan vara klokt se över möjligheten att använda ventilationen som resurs vid räddningsinsatser. Genom att installera ventilationssystem som klarar av större luftflöden och som kan regleras efter behov kan insatser underlättas och minska avståndet för räddningstjänst vid inträngning i rök.

Informationen som finns tillgänglig gällande Li-jonbatterier av stora format är begränsad. De tester som har genomförts har varit i storleksklassen av personbilar eller batterimoduler för att studera propagering eller termisk rusning. Utifrån fullskaliga försök finns vissa likheter mellan brandförloppet för förbränningsmotorer och elfordon. Brandförloppets längd har, enligt försöken, visat på att motsvarande personbilar brinner inom samma tidsram. Effektutvecklingen har snarlika utseenden och även den maximala effekten av samma storleksordning, se

Tabell 5-3. Brandens utveckling i batterifordon kommer att variera beroende på antändning och batteriets uppbyggnad. En långsammare utveckling kan fås genom passiva system. Detta är viktigt att beakta som skydd när det gäller stora batterier som används inom gruvindustrin.

Det är ett välkänt fenomen att brandens effektutveckling kan påverkas av hur omgivningen ser ut. I en tunnel kan effekten öka med en faktor 2, vid rätt vindstyrka. Information om hur effektutvecklingen för ett brinnande Li-jonbatteri skulle påverkas när det yttre skyddshöljet hindrar, eller begränsar, luftflödet har dock inte funnits att tillgå. Samtidigt kan det vid bränder i tunnlar med traditionella bränslen uppstå återcirkulering av inerta gaser som succesivt kväver branden tills den slocknar. För Li-jonbatterier är detta nödvändigtvis inte fallet eftersom katoden frigör syre vid upphettning. Några försök om vad detta resulterar i, har dock inte funnits att tillgå.

Ansamling av brandgaser är ett stort problem vid undermarksanläggningar och kombinerat med toxiska egenskaper kan självutrymning försvåras. Li-jonbatterier medför två risker gällande gaser, dels brandgaser som mestadels består utav förbränningsprodukter och termisk rusning där gaserna kan vara av mer toxisk natur och, för stora batterier, produceras i förhållandevis stora mängder. Detta framhäver vikten av att kunna detektera uppkommande eller pågående termisk rusning i ett tidigt skede som kan medföra ökade marginaler för utrymning. Även vid släckning kommer rökansamling att påverka insatsen. Eftersom batteriet kan vara placerat i främre delen av fordonet kan detta resultera i att batteriet kan bli svåråtkomligt, beroende på fordonets körriktning, i förhållande till möjlig angreppsväg.

Generellt när det gäller detektion av en brand har statistiken visat att det är personal som detekterar förekomsten av brand. I Li-jonbatterier mäts kontinuerligt temperaturen och med ett ökat antal mätpunkter i batteriets moduler och celler kan detektering av förhöjd temperatur ske fortare, varpå en brand möjligtvis kan förhindras eller en utrymning kan ske i ett tidigt skede.

För utrymning är det viktigt att veta hur brandens tillväxtfas ser ut och kan i viss mån påverkas genom batteriets uppbyggnad. Flamfronten i dieselbränder sprider sig fort utmed pölens yta och når en maximal effekt, detta inträffar inte med Li-jonbatterier eftersom de inte har samma egenskaper utan kan istället generera jetlågor, i takt med propagering, genom hål i det yttre skyddande höljet. Genom att propageringen avgör tillväxten är passiva system viktigt att beakta, vilket kan leda till en mindre intensiv utveckling av branden i förhållande till brännbara vätskor. Det är även viktigt att om möjligt, förhindra antändning av däcken, som utgör stor påverkan på brandförloppet.

När det gäller att förhindra propagering mellan celler med släckmedel, delas åsikten om släckmedlets primära egenskaper. Ett släckmedels förmåga att påverka och kyla en Li-jonbattericell som är i termisk rusning har till stor del att göra med släckmedlets specifika värmekapacitet. Många metoder kan slå ut lågorna, exempelvis inerta gassystem eller pulver, men dess kylande förmåga mot cellen eller modulen är låg. Detta är viktigt att beakta eftersom försök har visat att en liten del av värmeöverföringen mellan moduler uppkommer via flamman. Vid användning av släcksystem som är permanent installerade i batteriet bör även kylande släckmedel användas för att förhindra propagering mellan celler. När det kommer till släckning av Li-jonbatterier kan nyttan av pulversläckare följaktligen ifrågasättas, varpå det bör övervägas om vattensläckare eller skumsläckare ska rekommenderas som bekämpningsredskap för

bränder i Li-jonbatterier. Vidare kan det även diskuteras om släckförsök, för att minska ekonomiska skador, ska genomföras eller om självutrymning ska påbörjas direkt.

Vid laddning i Li-jonbatterier kan det vara klokt att utnyttja det faktum att objektet som laddas är stillastående. Det kan göras via extra detektorer, eller genom mer dramatiska släcksystem, som exempelvis vattenfylla en nedsänkning. På grund av det yttre höljet på batterierna har en avsedd funktion att förhindra inträngning av vatten är det svårt att veta hur väl denna metod skulle fungera i praktiken. När väl tryckavlastning i ytterhöljet sker, bör vatten kunna flöda in och kyla. Detta är dock något som borde undersökas närmare om detta kan användas som bekämpning och studeras i vilka avseenden som det kan nyttjas. Vid nedsänkning i vatten blir batteriet skadat varpå detta kanske inte ska användas i ett tidigt skede, utan vid större haveri. Möjligheten att aktivera vattentillförseln bör således vara möjligt från säkert avstånd från laddningsplatsen i fråga.

Tvättning av brandgaser, för att minska toxiciteten i rökgaserna, är en metod som används av räddningstjänsten. Det har inte varit möjligt att finna några gjorda försök som påvisar effekten, till vilken del toxiciteten minskar, vid tvättning av brandgaser. Tvättning av brandgaser medför även att spillvatten får högre halter av toxiska ämnen. Försöken som har gjorts gällande genomsläpplighet av HF genom räddningsställ, tyder på god motståndskraft. Det ska dock poängteras att detta gäller för hela bitar utan veck, sömmar eller skarvar under en begränsad tid samt att andra farliga ämnen släpps igenom.

10 Slutsatser

På grund av komplexiteten som en räddningsinsats under mark innebär, är det viktigt att personalen har god kännedom om rutinerna gällande säkerhet och utrymning.

Batteridrift i en gruva har många fördelar, men riskbilden ändras i det avseende att en explosiv miljö kan bildas vid tryckavlastning utan antändning samt att släckinsatsen kan medföra långa insatstider och stora vattenvolymer.

Den vanligaste brandorsaken är antändlig vätska på het yta som medför snabb tillväxt och betydande rökproduktion. Li-jonbatterier ska enligt visuella observationer avge mindre rök, vilket även kan stärkas av den summerade massan för brandgaser var lägre för elfordon än dieselfordon.

Utifrån försöken som har gjorts med antändning av fullskaliga fordon verkar det inte vara några större skillnader i brandförlopp mellan fordon med förbränningsmotorer och elmotor. En skillnad mellan elfordon och förbränningsfordon är risken för återantändning. Trots att elfordonet inte har några synliga lågor kan batteriet återantända om batteriet inte har kylts tillräckligt.

Gasernas förmåga att penetrera skyddsutrustningen har studerats och försök visar att de nuvarande klädnaderna, nya och gamla, som används av räddningstjänsten har hög motståndskraft gällande HF, dock finns det andra gaser som penetrerade skyddsutrustningen på en kort tid.

11 Framtida forskning

Följande punkter kan vara föremål för vidare studier.

- Fullständigt sänka ner Li-jonbatterier som påbörjar termisk rusning, om detta kan användas som kylmetod vid haveri under laddning vid mer kritiska miljöer.
- Kontrollera hur hela skyddsklädseln klarar av toxiska gaser, som HF, med fokus på skarvar och sömmar. Gjorda tester visar på gott skydd för vissa ämnen för helt intakta provbitar.
- Laserpekare som orienteringshjälp i rökfyllda miljöer, både räddningstjänst och personal.
- Skillnad i rökproduktion för dieselfordon och elfordon, t.ex. volymer eller komposition.
- Nyttan av att personal påbörjar en släckinsats med exempelvis handbrandsläckare mot ett fordon även om den möjligtvis inte lyckas.
- Tvättning av brandgaser, toxiciteten minskar till vilken andel.
- Metod för släckning om fordon står med batteriet åt ”fel håll”. Batteriet riktas bort från angreppsvägen och tillförsel av släckmedel försvåras på grund av maskinens övriga komponenter.

12 Referenser

- [1] Arbetsmiljöverket, "2010:1 Berg- och gruvarbete. Arbetsmiljöverkets föreskrifter om berg- och gruvarbete samt allmänna råd om tillämpningen av föreskrifterna".
- [2] R. Bisschop, O. Willstrand, F. Amon och M. Rosengren, "Fire Safety of Lithium-ion Batteries in Road Vehicles," RISE Research Institutes of Sweden, Borås, 2019.
- [3] W. H. M. Jacobs och T. Bräunl, "A Cost–Benefit Analysis of Electric Loaders to Reduce Diesel Emissions in Underground Hard Rock Mines," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 51, nr 3, pp. 2565-2573, 2015.
- [4] J. Teter, P. Cazzola och T. Gül, "The Future of Trucks Implications for energy and the environment," International Energy Agency &, 2017.
- [5] Epiroc, "Epiroc.com," [Online]. Available: <https://www.epiroc.com/sv-se/products/loaders-and-trucks/electric-trucks/minetruck-mt42-battery>. [Använd 01 08 2019].
- [6] J. Gehandler, P. Karlsson och L. Vylund, "Risker med nya energibärare i vägtunnlar och underjordiska garage," SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås, 2016.
- [7] T. Long Jr, A. Blum, T. Bress och B. Cotts, "Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results," Fire Protection Research Foundation, Quincy, 2013.
- [8] J. Paraszczak, E. Svedlund, K. Fytas och M. Laflamme, "Electrification of Loaders and Trucks – A Step Towards More Sustainable Underground Mining," i *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Cordoba, Spain, 2014.
- [9] A. Halim och M. Kerai, "Ventilation Requirement for 'Electric' Underground Hard Rock Mines – A Conceptual Study," i *The Australian Mine Ventilation Conference*, Adelaide, SA, 2013.
- [10] J. Paraszczak, K. Fytas och M. Laflamme, "Feasibility of Using Electric Trucks in Deep Metal Mines," *Mine Planning and Equipment Selection*, pp. 1265-1275, 2014.
- [11] K. Rajashekara, "Present Status and Future Trends in Electric Vehicle Propulsion Technologies," *IEEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN POWER ELECTRONICS*, vol. 1, nr 1, pp. 3-10, 2013.
- [12] S. Bäckman, Interviewee, *Utvecklingsingenjör Arbetsmiljö Boliden Mineral AB*. [Intervju]. 22 08 2019.

- [13] J.-Y. Hwang, S.-T. Myung och Y.-K. Sun, "Sodium-ion batteries: present and future," The Royal Society of Chemistry, Seoul, 2016.
- [14] R. Schatz, A. Nieto, C. Dogruoz och S. N. Lvov, "Using moder battery systems in light duty mining vehicles," *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 29, nr 4, pp. 243-265, 2015.
- [15] W. Luo, J. Wan, B. Ozdemir, W. Bao, Y. CHen, J. Dai, H. Lin, Y. Xu, F. Gu, V. Barone och L. Hu, "Potassium Ion Batteries with Graphitic Materials," *NANO letters*, 15, pp. 7671-7677, 2015.
- [16] N. Nitta, F. Wu, J. Tae Lee och G. Yushin, "Li-ion battery materials: present and future," *Materials Today, Volume 18, number 5*, pp. 252-264, 2015.
- [17] D. Sturk, L. Hoffmann och A. Ahlberg Tidblad, "Fire Tests on E-vehicle Battery Cells and Packs," *Traffic Injury Prevention*, pp. 159-164, 2015.
- [18] Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, "Brand i moderna bilar. Speciella faktorer att beakta i relation till olika drivsystem. Råd till räddningstjänst- och ambulanspersonal," Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, Revinge, 2017.
- [19] F. Larsson, "Lithium-ion Battery Safety - Assessment by Abuse Testing, Fluoride Gas Emissions and Fire Propagation," Chalmers University of technology, Göteborg, 2017.
- [20] V. Ruiz, A. Pfrang, A. Kriston, N. Omar, P. Van den Bossche och L. Boon-Brett, "A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 2017, 14 July 2017.
- [21] C. Hendricks, N. Willard, S. Mathew och M. Pecht, "A failure modes, mechanisms, and effects analysis (FMMEA) of lithium-ion batteries," Elsevier, Amsterdam, 2015.
- [22] F. Larsson, P. Andersson och B.-E. Mellander, "Battery Aspects on Fires in Electrified Vehicles," i *Proceedings from 3rd International Conference on Fires in Vehicle - FIVE 2014*, Berlin, 2014.
- [23] T. Yim, M.-S. Park, S.-G. Woo, H.-K. Kwon, J.-K. Yoo, Y. S. Jung, K. J. Kim, J.-S. Yu och Y.-J. Kim, "Self-Extinguishing Lithium Ion Batteries Based on Internally Embedded Fire-Extinguishing Microcapsules with Temperature-Responsiveness," American Chemical Society, 2015.
- [24] D. Lisabona och T. Snee, "A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries," Elsevier, Amsterdam, 2011.
- [25] V. Ruiz och A. Pfrang, "JRC exploratory research: Safer Li-ion batteries by preventing thermal propagation - Workshop report: summary & outcomes," Publications Office at the European Union, Lucembourg, 2018.

- [26] F. Larsson, P. Andersson och B.-E. Mellander, "Are electric vehicles safer than combustion engine vehicles?," *Systems Perspectives on Electromobility*, pp. 33-44, 2013.
- [27] X. S. J. Feng, M. Ouyang, F. Wang, X. He, L. Lu och H. Peng, "Characterization of penetration induced thermal runaway propagation process within a large format lithium ion battery module," Elsevier, Amsterdam, 2014.
- [28] T. Maloney, "Lithium Battery Thermal Runaway Vent Gas Analysis," National Technical Information Service, Springfield, VA, 2016.
- [29] P. Ribière, S. Grugeon, M. Morcrette, S. Boyanov, S. Laruelle och G. Marlair, "Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry," The Royal Society of Chemistry, Frankrike, 2012.
- [30] P. Ping, Q. Wang, P. Huang, K. Li, J. Sun, D. Kong och C. Chen, "Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test," Elsevier, Amsterdam, 2015.
- [31] U. Bergström, Å. Gustafsson, L. Hägglund, C. Lejon, D. Sturk och T. Tenggel, "Vented Gases and Aerosol of Automotive Li-ion LFP and NMC Batteries in Humidified Nitrogen under Thermal Load," Totalförsvarets Forskningsinstitut CBRN-skydd och säkerhet, 2015.
- [32] R. Hansen, "Fire behavior of mining vehicle in underground hard rock mines," *International Journal of Mining Science and Technology*, nr 27, pp. 627-634, 2017.
- [33] B. Truchot, F. Fouillen och S. Collet, "An experimental evaluation of toxic gas emission from vehicle fires," *Fire Safety Journal*, vol. 97, pp. 111 - 118, 2018.
- [34] R. Hansen, "Overview of fire and smoke spread in underground mines.," Mälardalen University, Västerås.
- [35] GRAMKO:s Arbetsgrupp Brand, "Brandskydd i gruv- och berganläggningar Samlade råd och anvisningar," SveMin, Stockholm, 2016.
- [36] A. Lönnermark och H. Ingason, "The Effect of Air Velocity on Heat Release Rate and Fire Development during Fires in Tunnels," vol. 9, pp. 701-712, 2008.
- [37] R. Hansen, Investigation on fire causes and fire behaviour. Vehicle fires in underground mines in Sweden 1988-2010, Västerås: Mälardalens Högskola, 2013.
- [38] GRAMKO, "Årsrapport 2015 Brandtillbud," GRAMKO, 2015.
- [39] GRAMKO, "Årsrapport 2016 Brandtillbud," GRAMKO, 2016.
- [40] M. De Rosa, "Analysis of Mine Fires for All U.S. Metal/Nonmetal Mining," National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Cincinnati, 2004.

- [41] Y. J. Ko, "A Study of the Heat Release Rate of Tunnel Fires and the Interaction between Suppression and Longitudinal Air Flows in Tunnels," Carleton University, Ottawa, 2011.
- [42] R. Hansen och H. Ingason, "Full-scale fire experiments with mining vehicles in an underground mine," Mälardalens Högskola, Västerås, 2013.
- [43] H. Ingason, R. Hansen, M. Kumm och H. Nyman, "Slutrapport Koncept för skydd mot brand och brandgasspridning i gruvor," Mälardalens Högskola, Västerås, 2010.
- [44] R. Hansen, "Design of fire scenarios for Australian underground hard rock mines - Applying data from full-scale fire experiments," *Journal of Sustainable Mining*, vol. 18, nr 4, pp. 163-173, 2019.
- [45] R. Hansen, "STUDY OF HEAT RELEASE RATES OF MINING VEHICLES IN UNDERGROUND HARD ROCK MINES," Mälardalen University, Västerås, 2015.
- [46] F. Colella, H. Biteau, N. Ponchaut, K. Marr, V. Somandepalli och Q. L. R. T. Horn, "Electric Vehicle Fires," i *Proceedings from Seventh International Symposium on Tunnel Safety and Security*, Montréal, Canada, 2016.
- [47] J. Gehandler och H. Ingason, "Principer och strategier för ventilation vid brand i undermarksanläggningar," RISE, Research Institutes of Sweden, Borås, 2018.
- [48] R. Hansen, "Smoke spread calculations for fires in underground mines," Mälardalens Högskola, Västerås, 2010.
- [49] A. Lecocq, M. Bertana, B. Truchot och G. Marlair, "Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle," INERIS – National Institute of Industrial Environment and Risks, Verneuil-en-Halatte, 2012.
- [50] N. Watanabe, O. Sugawa, T. Suwa och Y. Ogawa, "Comparison of fire behaviors of an electric-battery-powered vehicle and gasoline-powered vehicle in a real-scale fire test," i *Proceedings from 2nd International Conference on Fires in Vehicle - FIVE 2012*, Chicago, 2012.
- [51] R. Hansen och H. Ingason, "Heat release rate measurements of burning mining vehicle in an underground mine," *Fire Safety Journal*, vol. 61, pp. 12-25, 2013.
- [52] A. Lebkowski, "Electric Vehicle Fire Extinguishing System," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 93, nr 1, pp. 329-332, 2017.
- [53] H. Ingason och A. Lönnermark, "RECENT ACHIEVEMENTS REGARDING MEASURING OF TIME-HEAT AND TIME-TEMPERATURE DEVELOPMENT IN TUNNELS," i *First International Symposium*, Prague, 2004.
- [54] H. Ingason, Y. Zhen Li och A. Lönnermark, *Tunnel Fire Dynamixs*, New York: Springer, 2014.

- [55] A. Lönnermark och P. Blomqvist, "Emissions from an automobile fire," *Chemosphere*, vol. 62, pp. 1043 - 1056, 2006.
- [56] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia och X. He, "Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review," *Energy Storage Materials*, vol. 10, pp. 246-267, 2018.
- [57] F. Larsson, S. Bertilsson, M. Furlani, I. Albinsson och B.-E. Mellander, "Gas explosions and thermal runaways during external heating abuse of commercial lithium-ion graphite-LiCoO₂ cells at different levels of ageing," i *Lithium-ion Battery Safety - Assessment by Abuse Testing, Fluoride Gas Emissions and Fire Propagation*, Göteborg, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2017.
- [58] F. Larsson och B.-E. Mellander, "Lithium-ion Batteries used in Electrified Vehicles – General Risk Assessment and Construction Guidelines from a Fire and Gas Release Perspective," RISE, Research Institutes of Sweden, Borås, 2017.
- [59] T. Maloney, "Extinguishment of Lithium-Ion and Lithium-Metal Battery Fires," U.S. Department of Transportation, Washington DC, 2014.
- [60] M. Egelhaaf, D. Kress, D. Wolpert, T. Lange, R. Justen och H. Wilstermann, "Fire Fighting of Li-Ion Traction Batteries," SAE International, Warrendale, 2013.
- [61] P. Andersson, M. Arvidson, F. Evegren, M. Jandali och F. R. M. Larsson, "Lion Fire: Extinguishment and mitigation of fires in Li-ion batteries at sea," RISE Research Institutes of Sweden, Borås, 2018.
- [62] P. Russoa, C. Di Barib, M. Mazzaroc, A. De Rosac, Morriellod och Ilario, "Effective Fire Extinguishing Systems for Lithium-ion Battery," AIDIC Servizi, Italy, 2018.
- [63] L. Hoffman, "Immersion of 400 volt traction battery in fresh water and salt water," RISE, Research Institutes of Sweden, Borås, 2018.
- [64] M. Kumm, Rescue operations during construction of tunnels. A study of the fire and rescue services possibilities and their interaction with the tunnel constructor, Västerås: Mälardalens Högskola, 2010.
- [65] R. Hansen, "Literature survey - fire and smoke spread in underground mines," Mälardalens Högskola, Västerås, 2009.
- [66] Arbetsmiljöverket, "2007:7 Rök- och kemdykning. Arbetsmiljöverkets föreskrifter om rök- och kemdykning samt allmänna råd om tillämpningen".
- [67] S. Särdaqvist, "Vatten och andra släckmedel," Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, Karlstad, 2013.
- [68] "Norrländska Socialdemokraten," 22 06 2016. [Online]. Available: <https://www.nsd.se/nyheter/kiruna/brand-i-gruvan-10095422.aspx>. [Använd 30 08 2019].

- [69] L. Gillis, "NorthOntarioBuisness," 13 05 2019. [Online]. Available: <https://www.northernontariobusiness.com/industry-news/mining/december-fire-at-red-lake-mine-raises-red-flags-about-lithium-batteries-1440101>. [Använd 30 08 2019].
- [70] M. Kumm, Räddningsinsatser i kärntekniska anläggningar under mark. En kunskapsöversikt inför byggandet av ett svenskt slutförvar för använt kärnbränsle, Västerås: Mälardalens Högskola, 2013.
- [71] R. Hansen, "Fördjupad insatsplanering för nivå 775, Kirunagruvan," Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lund, 2003.
- [72] A. Palm, "Taktik och ledning vid brand i undermarksanläggningar - Analys av fullskaleförsök och tre verkliga händelser," Mälardalens Högskola, Västerås, 2014.
- [73] A. Palm, M. Kumm och H. Ingasson, "Full Scale Firefighting Tests in the Tristbrottet mine," *Fire Technology*, vol. 52, pp. 1519-1537, 2016.
- [74] J. Marklund och D. Haarala, "Fördjupad Olycksundersökning Gruvbrand 2013-08-23," Skellefteå Kommuns räddningstjänst, 2014.
- [75] R. Conti, "Responders to underground mine fires," National Institute for Occupational Safety and Health, Pittsburgh, u.d.
- [76] H. Ingason, A. Lönnermark, H. Frantzich och M. Kumm, "Fire incidents during construction work of tunnels," SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås, 2010.
- [77] L. Thors, H. Wingfors, A. Fredman, L. Hägglund, T. Tengel och M. Tunell, "Nya risker för räddningspersonal vid bränder/ gasning av batteripack hos e-fordon," Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, Karlstad, 2016.
- [78] H. Wingfors, A. Fredman och M. Thunell, "Test av skyddskläders skyddskapacitet mot kemikalier som bildas vid bränder och termisk rusning i Li-ion batterier i e-fordon," Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, Revinge, 2018.

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,200 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 200 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.



RISE Research Institutes of Sweden AB
Box 857, 501 15 BORÅS
Telephone: 010-516 50 00
E-mail: info@ri.se, Internet: www.ri.se

Safety
RISE Report 2019:84
ISBN: 978-91-89049-14-
7