

En studie av vilka brandtekniska krav som bör ställas på energilager innehållandes litiumjonbatterier

Stefan Einer och Victor Engvall
Brandteknik | LTH | LUNDS UNIVERSITET



**En studie av vilka brandtekniska krav
som bör ställas på energilager
innehållandes litiumjonbatterier**

Stefan Einer och Victor Engvall

Lund 2020

Titel: En studie kring vilka brandtekniska krav som bör ställas på framtida energilager innehållandes litiumjonbatterier.

Title: A study of fire protection requirements for energy storage systems with lithium-ion batteries.

Stefan Einer och Victor Engvall

Report 5596

ISRN: LUTVDG/TVBB--5596--SE

Antal sidor/Number of pages: 84

Illustrationer/Illustrations: 8

Sökord: Litiumjon-batteri, termisk rusning, energilagringssystem, toxiska gaser, antändning, räddningstjänst

Keywords: Lithium-ion battery, thermal runaway, energy storage systems, toxic gases, ignition, emergency services

Abstract

One of the most common batteries used for energy storage systems is the lithium-ion battery due to its high energy and power density as well as long service life. Despite this, research is falling behind in relation to how stationary energy storage systems should be regulated when it comes to fire protection requirements. The risks of placing a large amount of Li-ion batteries in one and the same place are relatively unknown and is therefore an area that requires attention and further analysis. This report aims to identify and analyse the risks that may arise when an energy storage system with Li-ion batteries is installed inside a building. Furthermore, the purpose is to interpret and reflect upon different experts' views on these risks and the solutions to limit them. The aim of the report is to stipulate possible fire-technical requirements for future energy storage systems in various buildings. The chosen methods were a literature study and an interview study, from which the results then were used to perform a risk evaluation. The findings of the report included, among others, that a stationary energy storage system with Li-ion batteries should be placed in a separate fire compartment provided with emergency ventilation. Legislation should also regulate where an energy storage system may be placed within a building, as well as its design.

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2020

Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2020.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

www.brand.lth.se
Telefon: 046 - 222 73 60

Division of Fire Safety Engineering
Faculty of Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden

www.brand.lth.se
Telephone: +46 46 222 73 60

Summary

The use of Lithium-ion batteries has grown significantly in the world since their introduction in the 1990s and can now be found in many of the appliances we use daily. Due to the rapid growth and large areas of application, safety research has been struggling to keep the same pace, which has resulted in several media-covered incidents over the years. At the same time, the need for sustainable energy in society is increasing, resulting in higher demand on how energy is extracted and how it is best stored in larger quantities for later use. Energy storages in the form of larger battery systems has therefore become increasingly common in many different types of buildings. One of the most common batteries used for energy storage systems is the lithium-ion battery due to its high energy and power density as well as long service life. Despite this, research is falling behind in relation to how stationary energy storage systems should be regulated when it comes to fire protection requirements. The hazards a large energy storage consisting of Li-ion cells pose are relatively unknown and is therefore an area that requires attention and further analysis.

This report aims to identify and analyse the risks that may arise when an energy storage system with Li-ion batteries is installed inside a building. Furthermore, the purpose is to interpret and reflect upon different experts' views on these risks and the solutions to limit them. The aim of the report is to stipulate possible fire-technical requirements for future energy storage systems in various buildings. A literature study, an interview study and a risk evaluation process were used as methods to reach the goal of the report. The findings are summarized here below:

- The energy storage system should be placed in a separate fire compartment
- Regulate where an energy storage system may be placed within a building, as well as its design
- Set requirements for labeling / signage of both the energy storage and the building in which it is located
- Emergency ventilation should be provided to the space where the system is being kept
- Procedures for rescue services should be implemented (during rescue and post handling of damaged batteries)

The requirement for the separate fire compartment and emergency ventilation was judged to be in need of further verification due to their technical nature and more extensive implementation process. Calculations were thus carried out for two different scenarios. The first scenario aimed to verify a fire compartments protection against an external fire and its heat transfer effect on the Li-ion batteries. The second scenario aimed to determine the effect of the emergency ventilation when ten pouch cells ignited inside an energy storage. The results showed that a higher fire resistance level than normal was needed to prevent the batteries inside the energy storage from reaching thermal runaway due to external heat transfer through the wall. In addition, the emergency ventilation required a flow of approximately 79 L/s to handle the gas production from the ignited pouch cells without pressure buildup inside the energy storage. A general equation was also developed which depends only on the dimensions of the room and the number of battery cells that are believed to ignite. Since relatively rough assumptions were used for the calculations, more detailed research in this area is needed to demonstrate the utility of the proposed measures.

Sammanfattning

Litium-jon-batterier har ökat markant på världsmarknaden sedan deras inträde under 90-talet och går nu att finna i många av de apparater vi använder oss av dagligen. I och med deras snabba tillväxt och stora användningsområden har inte säkerhetsforskningen hunnit med och det har resulterat i medieuppmärksammade incidenter under åren. Samtidigt ökar behovet av hållbar energi i samhället vilket resulterar i att det ställs högre krav på hur energi utvinns samt hur den på bästa sätt lagras i större kvantitet för senare användning. Energilager i form av större batterisystem har därför blivit alltmer vanliga i många olika sorters byggnader. Ett av de vanligaste batterierna som börjat användas till energilagring är litium-jon-batteriet, tack vare dess höga energi- och krafttäthet samt långa livslängd. Trots detta så släpar forskningen efter relaterat till hur stationära energilager bör skyddas rent brandtekniskt. Riskerna med att en större mängd batterier placeras i ett och samma utrymme är relativt okända och är därför ett område som kräver uppmärksamhet och vidare analys.

Denna rapport syftar till att identifiera och analysera de risker som kan tänkas uppstå då ett energilager med Li-jon-batterier inrättas inom en byggnad. Vidare så är syftet att tolka och reflektera kring olika sakkunnigas uppfattning beträffande dessa risker och lösningar för att begränsa dem. Målet med rapporten är att stipulera möjliga brandtekniska krav och skyddsmål för energilager inom diverse byggnader.

Det kan konstateras att det i dagsläget inte finns någon föreskrift i byggreglerna som specifikt ställer krav på energilager och hur de projekteras i Sverige. Utvecklingen inom området har gått snabbt framåt vilket resulterat i att lagstiftningen släpat efter. Internationellt sett finns det mer detaljerade lagstiftningar relaterat till energilager innehållandes Li-jon-batterier. Dessa kommer främst från USA, som har kommit en bit på vägen vad gäller reglering av energilagring.

För att kunna nå rapportens mål utgjordes arbetsgången av olika delar. En litteraturstudie genomfördes för att studera tidigare erfarenheter och kunskap inom området. Till denna söktes det både nationell och internationell information. Därefter identifierades ett antal respondenter som bedömdes besitta relevant kunskap inom ämnet för att genomföra en intervjustudie. Skyddsmål för energilager togs samtidigt fram med hjälp av respondenterna. En riskbedömning utfördes sedan, åtföljt av en utökad verifiering av utvalda åtgärdsförslag, där utformningen grundades i resultaten från intervju- och litteraturstudien.

Under riskbedömningens första del, riskidentifieringen, identifierades en händelsekedja som sedan användes som grund för den fortsatta arbetsgången. Denna kedja inleds med en termisk rusning, som sedan leder till ventilering av antändbara och toxiska gaser, vilka sedan kan antändas och initiera ett brandscenario. Sista delen av kedjan utgörs av räddningstjänstens insats. I riskbedömningens andra del, riskanalysen, analyserades händelsekedjans olika steg för att få fram sannolikhet och konsekvens. Riskanalysen banade sedan vägen för riskbedömningens tredje och sista del, riskvärderingen, där de identifierade riskerna vägdes mot de framtagna skyddsmålen med hjälp av riskanalysen. Riskvärderingen mynnade ut i ett antal riskreducerande åtgärdsförslag av olika karaktär:

- Energilagret bör placeras i en egen brandcell
- Reglera vart ett energilager får placeras inom en byggnad, samt dess utformning
- Ställ krav på märkning/skyltning av både energilagret och byggnaden den är placerad i
- Nödventilation
- Rutiner för räddningstjänst (insats och hantering av skadade batterier)

Kravet på egen brandcell och nödventilation bedömdes vara i behov av vidare verifiering och dimensionering på grund av deras mer tekniska karaktär och mer omfattande implementeringsprocess. Beräkningar genomfördes således för två olika scenarion. Det första scenariot var för att verifiera en brandcells skydd mot en extern brand och dess värmepåverkan på Li-jon-batterierna. Det andra var för att dimensionera nödventilationen då tio pouchceller antändes inuti ett energilager. Resultatet blev att en högre EI-gräns hade behövts för att förhindra risken att batterierna inuti energilagret hamnade i

termisk rusning på grund av yttre värmepåverkan. Nödventilationen hade behövt ett flöde på cirka 79 L/s för att hantera brandgasproduktionen från de antända pouchcellerna. En generell ekvation togs samtidigt fram som endast beror av rummets dimensioner och antal celler som antas antändas. Eftersom relativt grova antaganden användes för beräkningarna krävs mer detaljerad forskning inom detta område för att påvisa åtgärdsförslagets nytta.

Förord

Detta är ett examensarbete på 30 HP som fullbordar våra studier som brandingenjörer samt Civilingenjörer inom Riskhantering vid Lunds Tekniska Högskola. Arbetet har utförts för, och i samarbete med, avdelningen för Brandteknik under perioden 2019-08-01 – 2020-01-17.

Vi vill börja med att tacka vår primära handledare på avdelningen för Brandteknik, Marcus Runefors, för ovärderlig vägledning genom hela arbetets gång. Ett bättre bollplank och idéspruta får man leta efter. Vi vill också rikta ett stort tack till vår externa handledare på RISE forskningsinstitut, Petra Andersson, för all hjälp på vägen.

Vidare vill vi också ge ett stort tack till Martin Estlund på Bengt Dahlgren som hjälpte oss att forma vår idé till något mer strukturerat och konkret. Alla våra respondenter skall också ha ett varmt tack för att de tog sig tid och ställde upp på en intervju, samt för de mycket givande svaren och åsikterna de gav oss. Vi vill samtidigt tacka Fikagruppen för oskattbara pauser och mingel utan dess like.

Slutligen skulle vi båda vilja tacka av V-sektionen för att ha agerat surrogatfamilj åt oss de senaste 4,5 åren. Tack för allt den lärt oss, för allt kul vi haft, för alla människor vi träffat, för alla dumheter vi har hittat på, och sist men inte minst, för alla vänner vi fått.

Stefan Einer och Victor Engvall

Lund, januari 2019

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund.....	1
1.2	Syfte och Mål.....	2
1.3	Avgränsningar.....	3
2	Teori.....	5
2.1	Litium-jon-batteriet.....	5
2.1.1	Battericell.....	6
2.1.2	Batterisystem	7
2.1.3	Energilager.....	8
2.2	Lagstiftning.....	9
2.2.1	Nationell lagstiftning	9
2.2.2	Internationell lagstiftning.....	10
3	Metod.....	13
3.1	Litteraturstudie.....	13
3.2	Intervjustudie	13
3.2.1	Respondenter	14
3.2.2	Intervjuförberedelse.....	14
3.3	Skyddsmål.....	15
3.4	Riskbedömning	15
3.4.1	Riskidentifiering	16
3.4.2	Riskanalys.....	16
3.4.3	Riskvärdering.....	17
3.5	Kompletterande verifiering och dimensionering	17
4	Skyddsmål.....	19
5	Riskbedömning	21
5.1	Riskidentifiering	21
5.1.1	Termisk rusning	21
5.1.2	Toxiska gaser.....	24
5.1.3	Antändning	25
5.1.4	Räddningstjänstens insats	25
5.2	Riskanalys.....	26
5.2.1	Termisk rusning och energilager	26
5.2.2	Analys av toxiska gaser	27
5.2.3	Analys av antändning	28
5.2.4	Analys av räddningstjänstens insats	29
5.3	Riskvärdering.....	30

5.3.1	Riskvärdering av toxiska gaser	31
5.3.2	Riskvärdering av antändning	32
5.3.3	Riskvärdering av räddningstjänstens insats	33
5.3.4	Summering av riskvärdering.....	35
6	Kompletterande verifiering och dimensionering	37
6.1	Verifiering och dimensionering av brandcell	37
6.2	Verifiering och dimensionering av nödventilation	38
7	Slutsats.....	41
	Referenser	43
	Bilaga A	46
	Bilaga B	48
	Bilaga B1	48
	Bilaga B2	50
	Bilaga B3	52
	Bilaga B4	54
	Bilaga B5	56
	Bilaga B6	58
	Bilaga B7	60
	Bilaga B8	62
	Bilaga B9	63
	Bilaga B10	65
	Bilaga C	67
	Bilaga D	70

1 Inledning

Energi och hur den hanteras samt dess miljöpåverkan tar allt större plats i samhällsdebatten vilket gör att fler och fler börjar bli medvetna om problemen med energiförbrukningen. Det står klart att dagens samhälle är ohållbart där det förbrukas mer av de befintliga energikällorna än vad planeten klarar av. En av lösningarna till detta är att konstruera grönare byggnader som är helt eller till viss del självförsörjande vad gäller energi genom att installera till exempel solceller. Solenergi styrs dock till stor del av faktorer utanför människans kontroll, vilket gör att när energi väl produceras måste det som inte används direkt kunna lagras för senare användning. Byggnaden behöver följaktligen utrustas med ett energilager som kan lagra den oanvända energin. I dagsläget är det främst batterier som ses som ett alternativ för detta, och då särskilt litiumjon-batterier (Li-jon-batterier). Detta på grund av att de bland annat ligger i framkant vad gäller energidensitet och livslängd. De har dock visat sig vara känsligare för till exempel temperaturfluktuationer jämfört med andra batterier och kan ha ett intensivt brandförlopp vid antändning. Ett energilager utrustat med litium-jon-batterier ställer följaktligen krav på utrymmet de är placerade i, rent brandtekniskt, för att minska riskbildningen för brandspridning och fara för människor i byggnaden. Det saknas dock för tillfället gällande lagstiftning och riktlinjer för hur ett sådant utrymme skall projekteras i Sverige. Denna brist lade grunden för följande rapport. Nedan presenteras rapportens bakgrund samt syfte och mål.

1.1 Bakgrund

Li-jon-batterierna har ökat explosionsartat på världsmarknaden sedan deras inträde under 90-talet och finns nu att finna i många av de apparater som används dagligen, så som mobiltelefoner, datorer och hemelektronik. I och med deras snabba tillväxt och stora användningsområden har inte säkerhetsforskningen hunnit med och det har resulterat i medieuppmärksammade incidenter under åren. Samsung var till exempel tvungna att återkalla samtliga mobiltelefoner av modellen Samsung Galaxy Note 7 år 2016 då de mottagit flertalet rapporter om att batteriet hade börjat brinna (Chawla, et al., 2019). Flygindustrin har också fått skärpa sin säkerhet när det kommer till Li-jon-batterier efter en rad olyckor på flygplatser och i flygplan. För att nämna några; år 2010 störtade ett amerikanskt fraktplan på grund av en brand i lastutrymmet orsakad av dessa batterier, år 2017 exploderade batteriet i en kamera vid en säkerhetskontroll i Orlando vilket gjorde att hela terminalen var tvungen att bli evakuerad. I januari 2018 började en E-cigarett brinna under röntgenvisningen på flygplatsen i Denver, samma månad fattade en resväska eld innehållandes en power bank med ett Li-jon-batteri på flygplatsen i Shanghai (Chawla, et al., 2019). Bilindustrin har också drabbats de senaste åren då Li-jon-batterier blivit alltmer använda som primär kraftkälla för elektroniska fordon. Bilar har både börjat brinna stillastående i garage och körandes på vägar på grund av batteriets komplicerade och relativt känsliga konstruktion (Sandén & Wallgren, 2014). Detta är bara ett axplock av de incidenter och olyckor som inträffat de senaste åren relaterat till Li-jon-batterier, vilket har resulterat i att ett varningens finger nu höjts inom byggindustrin då dessa batterier kan komma att utgöra framtidens energilager. Än så länge existerar det därför begränsat med data från incidenter relaterat till energilager inom byggnader, varpå ovan exempel mest riktar till Li-jon-batterier mer generellt.

Med ett ökande behov av hållbar energi i samhället ställs högre krav på hur energi utvinns samt hur den på bästa sätt lagras i större kvantitet för senare användning. Energilager i form av större batterisystem har därför blivit alltmer vanliga i många olika sorters byggnader. Detta kan bland annat vara för att uppnå en stabilare leverans från förnyelsebara energikällor som till exempel vind-eller solkraft, vilka kan ha en energiproduktion som är svår att förutse på grund av olika väderförhållanden. Ett vanligt användningsområde är även för så kallade UPS-rum (Uninterruptible Power Supply), vilka oftast används i sjukhusbyggnader och större fabriker där avbrott i verksamheten ej är önskvärt, samt för

räddningshissar. Dessa fungerar då endast som lager och är då inte kopplat till något som genererar el, så som solceller.

Ett av de vanligaste batterierna som börjat användas till energilagring är litium-jonbatteriet på grund av dess höga energi- och krafttäthet samt långa livslängd (Andersson, et al., 2017). Li-jon batterier är stabila inom ett begränsat arbetsintervall vad gäller temperatur och spänning. Om de får arbeta utanför detta intervall, eller utsätts för mekanisk påverkan så som stötar, kan de hamna i termisk rusning. Detta fenomen innebär att det sker en okontrollerad frigörelse av batteriets energi i form av exoterma reaktioner inuti batteriet, vilket medför att temperaturen i batteriet fortsätter att höjas och gaser släpps ut. Dessa kan antändas av batteriet självt eller av en yttre källa. När detta sker kan batteriet vara svårsläckt på grund av värmeutvecklingen i cellen, dessutom består ett batteri av flera celler och värmen kan spridas från cell till cell och orsaka nya termiska rusningar, vilket gör dem oförutsägbara och svårhanterliga om de skadas. Detta förlopp kan vara under en mycket kort stund men också fortlöpa över en längre period, upp till timmar och ibland dagar (Larsson, 2017). Li-jon-batterier innehåller även en brännbar elektrolyt som kan ge en hög effektutveckling om den antänds. Förutom brännbara gaser kan dessa batterier också ventileras ut mycket toxiska gaser, däribland vätefluorid, redan innan antändning (Andersson, et al., 2017).

Många möjliga felfall (överbildningar med mera) hanteras av batteriets egna BMS (Battery Management System) men den kan till exempel inte hantera intern kortslutning i en cell, samt alla former av extern påverkan. Man har relativt nyligen börjat ta fram krav på batterier för att förhindra att när en eventuell termisk rusning sker skall denna inte propagera till intilliggande celler, moduler eller batteripack. Detta kan exempelvis göras med passiva inneslutningsmetoder eller att batterierna placeras med ett visst säkerhetsavstånd från varandra (Elsäkerhetsverket, 2016). Fokus bör också läggas på de brandtekniska krav som kan tänkas användas för att skydda utrymmet där batterierna är placerade, i dagsläget saknas nationella byggregler för detta. Marknaden är i stort behov av specifika riktlinjer för Li-jon-batterier då de blir allt vanligare, brandskyddskraven är mer av allmän karaktär i dessa avseenden (MSB, 2019). Trots detta så släpar forskningen efter relaterat till hur stationära energilagrar bör skyddas rent brandtekniskt (Elsäkerhetsverket, 2016). Riskerna med att en större mängd batterier placeras i ett och samma utrymme är relativt okända och är därför ett område som kräver uppmärksamhet och vidare analys. Forskning pågår och säkerheten blir bättre, men frågan är om den kommer kunna hålla samma tempo som utvecklingen.

1.2 Syfte och Mål

Rapporten syftar till att identifiera och analysera de risker som kan tänkas uppstå då ett energilager med Li-jon-batterier inrättas inom en byggnad. Vidare så är syftet att tolka och reflektera kring olika sakkunnigas uppfattning beträffande dessa risker och lösningar för att begränsa dem.

Målet med rapporten är att stipulera möjliga brandtekniska krav och skyddsmål för energilager inom diverse byggnader.

Arbetet har för avsikt att svara på tre primära frågeställningar som legat till grund för rapporten:

- Vilka risker finns i dagsläget dokumenterade kring Li-jon-batterier? Vad bör skyddsmålen vara i en byggnad utrustad med ett energilager?
- Vad tror olika aktörer kan vara de största utmaningarna med att skydda energilager rent brandtekniskt? Vilka åtgärder hade de helst sett bli implementerade i praktiken?
- Vad är rimliga krav att ställa?

1.3 Avgränsningar

Genom att besvara ovan nämnda frågeställningar bedömdes samtidigt rapportens syfte och mål till stor del vara besvarade. För att uppnå bästa möjliga resultat på den fastställda tiden behövdes dock ett par avgränsningar för att minska rapportens omfattning.

Rapporten fokuserar endast på energilagring med Li-jon-batterier och berör således inte andra typer av energilagring än med just denna typ av batteri. Rapportens fokus ligger heller inte kring batterierna i sig, utan utrymmet som de placeras i och hur detta skall projekteras för att minska konsekvenserna av en eventuell brand. Vad som kan förbättras mer tekniskt inuti ett batteri för att förhindra att exempelvis en termisk rusning inträffar ansågs således ligga utanför denna rapports ramar. Det är de byggnadstekniska aspekterna som har varit det primära ändamålet. Vidare så har inga tester genomförts, utan all data är tagen från tidigare genomförda testförsök och rapporter. Endast en kort överblick genomfördes kring hur lagstiftning ser ut internationellt, där fokus primärt låg på USA.

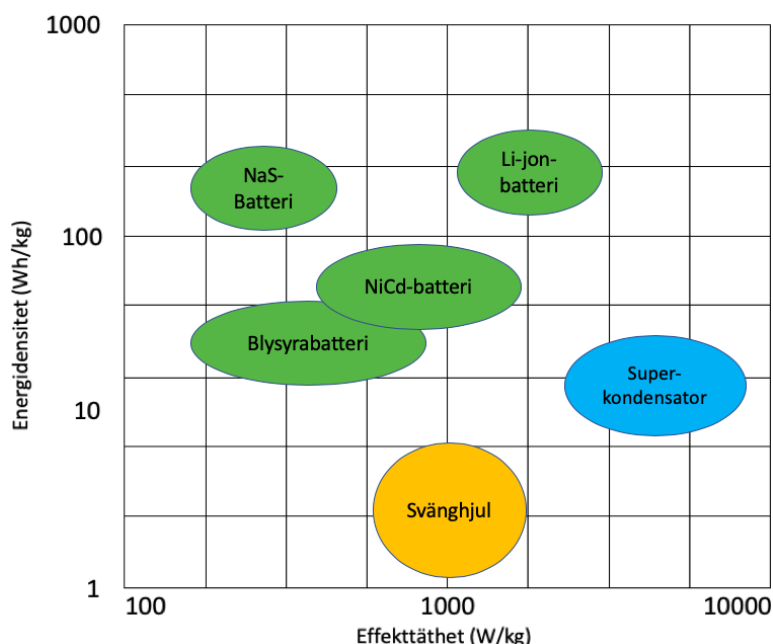
2 Teori

I följande kapitel presenteras teorin som ligger till grund för rapporten. Målet är att ge läsaren en bättre förståelse för Li-jon-batteriets uppbyggnad och funktion, samt varför dess användning lämpar sig bra för energilagring. Vidare förklaras energilagring mer ingående och hur detta fenomen hanteras i byggreglerna både nationellt och internationellt.

2.1 Litium-jon-batteriet

Batteriet har varit med oss människor i över 200 år, ända sedan Alessandro Volta skapade det första galvaniska elementet i början på 1800-talet. Sedan dess har batterier varit ett stort område för forskning då dess användningsområden snabbt växte. Utvecklingen har kommit långt och i dagens samhälle har vi flertalet olika batterityper bestående av många olika material med skiftande spänningskapaciteter, former och storlekar. Det finns två huvudkategorier av batterier, nämligen primära och sekundära batterier. De primära batterierna är engångsartiklar och när energin i dem är slut skall de återvinnas. De kan alltså inte laddas upp igen för att återigen användas. De sekundära batterierna är uppladdningsbara och kan återanvändas efter att de laddats ur, men även de har en gräns för hur många livscyklar (uppladdning – urladdning) de håller för.

Det kanske vanligaste batteriet, bly-syra-batteriet, har funnits i över 150 år och är därför mycket välutvecklat, säkert och kostnadseffektivt (Andersson, et al., 2017). Dess marknadsandel är dock avtagande då ny forskning tagit fram batterier med bland annat högre energitäthet, längre livslängd och snabbare uppladdningstider, se Figur 1 för en jämförelse mellan olika batterityper. Forskningen involverar i huvudsak att undersöka olika kombinationer och sammansättningar av anod- och katodmaterial samt elektrolytblandningar inom battericellen. Utvecklingen inom detta område går snabbt framåt vilket har resulterat i att de nya batterityperna inte har fått tid att mogna på samma sätt som bly-syra-batteriet. Detta har i sin tur medfört att batterier av olika slag som fortfarande innehållit okända risker har lanserats på marknaden, vilket i vissa fall har lett till egendom- och personsador. Ett modernt exempel är Li-jon-batteriet vilket ligger i fokus för denna rapport.



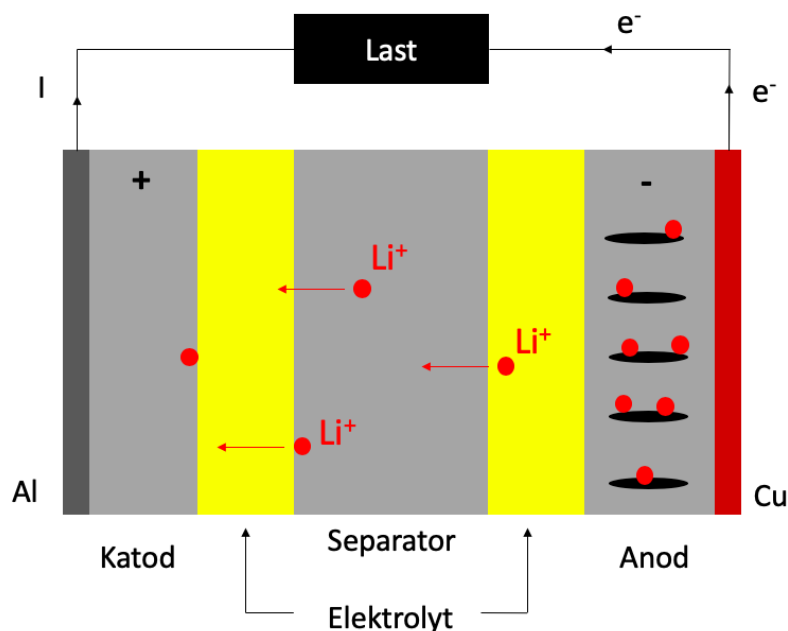
Figur 1: Li-jon-batteriet jämfört med flera andra typer av batterier. Data tagen från Elsäkerhetsverket (2016).

Användningen av Li-jon-batterier har stigit sedan dess lansering i början av 90-talet, och dagens trender tyder inte på att den kommer sjunka. Li-jon-batteriet ligger i framkant vad gäller energi- och kraftdensitet och tar mindre plats än de flesta kommersiella batterier på marknaden. Det är dock relativt temperaturkänsligt med en optimal arbetstemperatur som sträcker sig mellan -20 till +50 °C (Bisschop,

et al., 2019), beroendes på vilken elektrolyt och batterikemi som används. Mindre temperaturspann är dock vanliga, Elsäkerhetsverket (2019) uppger till exempel en optimal arbetstemperatur på +5 till +40 °C. Li-jon-batterier har utöver detta också ett visst spänningsområde som det är stabilt inom och kan ta skada om det till exempelvis överladdas, djupurladdas, eller kortsluts. Dessa påfrestningar kan leda till en kemisk reaktion inuti battericellen som kallas termisk rusning, vilket gör att denna typ av batterier kan vara relativt vanskliga.

2.1.1 Battericell

En vanlig cell i ett Li-jon-batteri består av två elektroder och en avskiljande separator, som alla är indränkta i en elektrolytlösning. Separatoren är ett genomsläppligt membran vars uppgift är att hålla isär elektroderna för att undvika kortslutning samtidigt som den skall släppa igenom de vandrande litiumjonerna. Separatoren består oftast av polyeten eller polypropen. Namnet Li-jon-batteri kommer från att det är litiumjoner (Li^+) som vandrar i elektrolyten mellan anoden och katoden, vilket får elektronerna att vandra mellan plus och minuspolen i en krets så att en ström uppstår, se Figur 2. Det är endast litiumjonerna som är den gemensamma nämnaren mellan olika typer av Li-jon-batterier.



Figur 2: Schematisk bild över en Li-jon-battericell vid urladdning. Observera att bilden endast visar ett exempel på anod- och katodmaterial, fler varianter existerar. Pilarna i bilden går i motsatt riktning vid laddning av batteriet. Översatt bild ur Larsson (2017).

Elektrolyten är organisk och innehåller ett antal tillsatssämnen som bidrar till bland annat batteriets stabilitet och livslängd. Den är dock brännbar vilket kan bidra till batteriets häftiga effektutveckling vid brand. Sammansättningen av elektrolyten skiljer sig mellan olika typer av batterier. Den negativt laddade elektroden (anod) består i dagsläget vanligtvis av grafit eller någon typ av grafitmix (oftast utblandat med en liten procent kisel). Den positivt laddade elektroden (katoden) kan bestå av många olika typer av metalloxider, till exempel nickel, kobolt, mangan, men också fosfater, där den vanligaste är järnfosfat. Det är oftast valet av katodmaterial som ger batteriet dess egenskaper då anoden nästan alltid består av samma material i kommersiella batterier (Akhil, et al., 2015).

Strukturen av cellen, som beskrivit här ovan, kan utformas på ett par olika sätt för att anpassas till olika användningsområden. De vanligaste uppbyggnaderna är cylindrisk-, prismatisk-, pouch-, och knappcell. Den cylindriska cellens ingående elektroder och separator rullas ihop till en cylinder som placeras i ett ytterhölje av rostfritt stål (cellkanna). Detta är oftast utformningen för vanliga primära batterier. I den prismatiska cellen viks istället elektroderna och separatorn ihop, men de kan också läggas i ark om varannan katod och varannan anod i en cellkanna av vanligtvis aluminium. Pouchcellen

har ungefär samma uppbyggnad som den prismatiska förutom att den har en annorlunda cellkanna bestående av en tunn laminerad aluminiumfolie, vilket gör den känsligare. Detta kan ibland åtgärdas med ett ytterligare hölje av plast vilket oftast är fallet då cellen används i mobiltelefoner. Den minst förekommande uppbyggnaden är knappcellen där anoden och katoden staplas om vartannat, med katoden innesluten i separatormaterial. Denna typ är oftast inbyggda i produkter vilket minskar handhavandet av dem för användare (Batteriföreningen, 2019).

Det är viktigt att dagens batterier kan innehålla en stor mängd energi och i takt med att utvecklingen går framåt designas allt mer effektiva Li-jon-batterier. Jämförelsevis kan ett alkaliskt D-batteri av modellen ”Sony Stamina Plus” innehålla 13 500 joule medan ett Li-jon-batteri i form av en pouchcell kan innehålla 518 400 joule (Amon, et al., 2012). Ny teknik gör att det går att lagra allt större mängd energi i ett batteri, vilket innebär en större fara om batterierna skulle ta skada.

2.1.2 Batterisystem

När flera battericeller kopplas ihop bildas en modul, och när flera moduler kopplas samman bildas ett batteripaket. Dessa batteripaket kan sammankopplas för att bilda ett batterisystem, som exempelvis kan utgöra ett energilager. De flesta batterier har mindre inbyggda säkerhetsanordningar, ofta kallade protection circuit module (PCM). Exempel på dessa är Positive Thermal Coefficient (PTC), vilket skyddar mot externa kortslutningar, och Current Interrupt Device (CID), som stänger av batteriet helt då trycket i cellen blir för högt. När det börjar bli så pass komplext som fallet med ett batterisystem krävs dock mer omfattande styrande funktioner för att kontrollera systemets funktion och hälsa (Larsson, 2017). Denna uppgift fyller ett så kallat BMS (Battery Management System), vilket är integrerat i batterisystemet för att övervaka känsliga parametrar som kan påverka batteriets prestation. Beroende på hur komplext och omfattande batterisystemet är utformat kan BMSen ta allt från en separat övervakande roll till att vara integrerat i hela systemet med styrande funktioner. Detta är oftast fallet i elbilar då batteriet har en mycket större funktion i dessa jämfört med till exempel hybrid-eller bensinbilar. BMSen övervakar vanligtvis batteriets inre temperatur (antalet mätpunkter kan variera), enskilda cellers spänning, strömstyrka och state of charge (SOC), vilket är batteriets laddningstillstånd. För mer avancerade system kan ibland också batteriets state of health (SOH) mätas, vilket är ett mått (i procent) på hur batteriet presterar kapacitetsmässigt jämfört med vad det gjorde i nyskick, eller enklare sagt, hur det har åldrats (Bisschop, et al., 2019).

BMSens prioriterade uppgift är att hålla batteriet inom dess optimala operativa fönster vad gäller ovanstående parametrar. Vid upptäckt av eventuellt skadliga förhållanden, till exempel för hög arbetstemperatur eller för låg spänning, kan en rad olika åtgärder tas. Bland annat kan strömmen brytas vid kortslutningar och kylande funktioner kan startas vid överhettning. I Tabell 1 här nedan visas en överskådlig bild av vilka påfrestningar BMSen kan hantera, och på vilket sätt det gör det. Det kan dessvärre inte skydda batteriet från alla tänkbara påfrestningar (Larsson, 2017).

Tabell 1: En förenklad överblick av olika påfrestningar som BMSen kan, eller inte kan, skydda batterisystemet från (Larsson, 2017).

Typ av skada/påverkan	Skydd från BMS?	Skyddsprocedur
Extern kortslutning i batteripack	Ja	Kopplar ifrån batteriet genom säkringar eller möjligtvis en kontaktor
Extern kortslutning i battericell	Möjlig*	BMS kan utgöra ett skydd om strömmen från kortslutningen kan avbrytas av en automatsäkring
Intern kortslutning	Nej	-
Överladdning	Ja	Kopplar ifrån batteriet med hjälp av en kontaktor
Djupurladdning	Ja	Kopplar ifrån batteriet med hjälp av en kontaktor
Kross / deformation / penetration	Nej	-
Mindre yttre uppvärmning	Ja	Kylning genom inbyggt kylsystem
Stor yttre uppvärmning	Nej	-

* Hänvisar till en situation där extern kortslutning av en eller flera celler sker inuti ett batteri. Teoretiskt sätt är kortslutning möjlig inom flera strömledningar, och en kortslutning kan förhindras om strömledningen innehåller en säkring eller en kontaktor.

2.1.3 Energilager

Efterfrågan på förnyelsebara energikällor är något som ökar mer och mer i takt med att viljan att minska samhällets klimatpåverkan stiger. Forskningen gör framsteg inom många olika områden, men för tillfället ligger mycket förhoppningar och fokus på bland annat sol- och vindkraft. Av naturliga skäl kan tillgången på utvunnen energi från sol- och vindkraft variera från dag till dag eller till och med från timme till timme, vilket reducerar tillförlitligheten hos dessa energikällor. Det mest lovande sättet att hantera detta problem i dagsläget är med så kallade energilager. Principen för dessa är att energin som utvinns kan lagras på olika sätt om den för tillfället inte behövs. Detta för att dra maximal nytta av de tider då det går att utvinna stora mängder energi, vilket sedan används för att bistå det vanliga elnätet vid energianvändningstoppar samt för lagring till dagar då väderförhållandena inte är lika gynnsamma.

Denna typ av batterilager kan bestå av olika varianter av batterier och Li-jon är ett alternativ som används för detta ändamål. Li-jon-batterier har varit den vanligaste typen under de senaste åren och dess marknadsandelar fortsätter att växa (FM Global, 2017). Tester har utförts på ett hushåll i Tyskland där solceller var installerade med ett integrerat energilager som använde sig av Li-jon-batterier. Ur testerna kunde man se att tack vare att energin lagrades i energilagret kunde man tillgodose cirka 80 % av hushållets energibehov från solkraft, och för dessa typer av system kopplat till mindre hushåll ses Li-jon-batterier därför som det bästa alternativet just nu (Vetter & Rohr, 2014). Detta skiljer sig dock mycket från land till land beroendes på klimat och är inte nödvändigtvis representativt för Sverige. Forskning pågår även för att ta fram effektivare Li-jon-batterier med andra beståndsdelar jämfört med dagens sammansättningar. Litiumtitanatbatteriet är ett sådant exempel på Li-jon-batteri, och jämfört med exempelvis blyackumulatorer kan det ur tester visas att användandet av litiumtitanat i battericellen ökar kapaciteten med 90 % för ett energilager i ett hushåll (Vetter & Rohr, 2014).

Användningsområdet för energilager med Li-jon-batterier växer och inkluderar allt från mindre bostäder och företag till försörjning av större elnät. De kan bland annat nyttjas som energibackup, stötning vid användningstoppar och för att kunna köpa el när priset är lågt för senare användning (Lönnermark, 2018). Ett energilager ämnat för användning i ett hushåll kan vanligtvis lagra mellan 1–10 kWh, medan större kommersiella system kan ge runt 20–100 kWh (Blum & Long, 2016). Ett energilager kan variera i storlek och består av ett flertal komponenter, där battericeller utgör byggklossarna. Utrymmet i vilket bland annat ett energilager ryms i kan utgöras av ett enskilt rum i en

större byggnad, i en inhägnad placerad utanför en byggnad eller i en egen byggnad då systemet är stort (FM Global, 2017).

2.2 Lagstiftning

I detta avsnitt ges en överblick på gällande lagstiftningar.

2.2.1 Nationell lagstiftning

Det kan konstateras att det i dagsläget inte finns någon föreskrift i byggreglerna som specifikt ställer krav på energilager och hur de projekteras i Sverige. Utvecklingen inom området har gått snabbt framåt vilket resulterat i att lagstiftningen släpar efter (Ottosson, 2018). I Boverkets Byggregler (BBR) går det inte att finna en enda referens till vare sig energilager eller batterilager (Boverket, 2018). Vid kommunikation med Boverket¹ bekräftades detta, samtidigt som de skriver att det för närvarande inte pågår något arbete med att ändra byggreglerna.

”Boverket har i dagsläget inga specifika regler för lokaler med litiumbatterier utan de allmänna reglerna om exempelvis brandcellsindelning och utrymnings säkerhet i Boverkets byggregler får tillämpas utifrån de risker som finns med batterilagring. Något särskilt arbete pågår inte för närvarande med att ändra byggreglerna kring vad som exempelvis bör vara en egen brandcell.”

Boverket (2018) tar endast upp avsnitt 5:53 i Boverkets Byggregler som exempel på redan existerande föreskrift som kan tolkas reglera dessa utrymmen i dagsläget. Se utdrag ur BBR här nedan, relevanta delar är fetmarkerade.

5:53 Brandcellsindelning

*Byggnader ska delas in i brandceller i sådan omfattning att det medför tillräcklig tid för utrymning och **att konsekvenserna på grund av brand begränsas**. För mindre byggnader med en verksamhet där konsekvenserna av en brand är ringa behövs inga brandceller. Brandcellsindelning får helt eller delvis ersättas av brandtekniska installationer. (BFS 2011:26).*

Allmänt råd

*Utrymmen i olika verksamhetsklasser bör placeras i skilda brandceller. Som alternativ kan samtliga utrymmen i olika verksamhetsklasser inom brandcellen utformas så att kraven på brandskydd som gäller för varje ingående verksamhet uppfylls. Utrymningsvägar bör utgöra egna brandceller. Andra utrymmen som bör utgöra egna brandceller anges i avsnitt 5:54. **Utrymmen i byggnader med verksamhet som medför stor sannolikhet för uppkomst av brand och där en sådan kan få stora konsekvenser för utrymnings säkerheten bör delas in i egna brandceller**. Sådana utrymmen kan vara lokaler där man utför heta arbeten, garage, **avskilda pannrum**, storkök, avfallsrum och liknande. Brandceller bör avskilja rum med hög brandbelastning (>1 600 MJ/m²) eller lokaler i verksamhetsklass 6 från övriga utrymmen.*

För närvarande existerar alltså endast en föreskrift som på något sätt reglerar energilager och hur dessa bör projekteras. Om ens lite diffust då det fortfarande är en tolkningsfråga huruvida ett batterilager medför stor sannolikhet för uppkomst av brand eller inte. Vidare så uttrycker sig Boverket¹ dock om hur de kan tänka sig att ett energilager kan tolkas om dess risker fastställs:

*”Om batterilagring/laddning är ett sådant utrymme som riskmässigt kan jämföras med t.ex. garage, **pannrum** och liknande som nämns som exempel på brandceller i det*

¹ Johansson, Anders; Brandingenjör på Boverket, Karlskrona. 2019. Mailkommunikation 23 september. Diarienummer 6400/2018.

allmänna rådet till BBR 5:53 får man avgöra i de enskilda fallen. I en sådan bedömning kan ingå vilken typ av batterier som laddas, hur många batterier det är, vad är det för verksamhet runt om kring och hur kan en brand påverka utrymningssäkerheten m.m.”

Nedanstående föreskrifter är vad BBR säger angående pannrum, vilket bedömdes vara den högst troliga liknelsen av de utrymmen som Boverket tog upp här ovan.

5:249 Avskilt pannrum

Med avskilt pannrum avses sådana pannrum som är särskilt utformade med skydd mot utveckling och spridning av brand och brandgas. (BFS 2011:26).

Allmänt råd

Avskilda pannrum och bränslefföråd i direkt anslutning till ett avskilt pannrum bör utformas som egen brandcell. (BFS 2011:26).

5:427 Avskilt pannrum

Allmänt råd

En panna eller flera pannor, vars sammanlagda märkeffekt överstiger 60 kW bör installeras i avskilt pannrum. Avskilt pannrum bör endast genom luftsluss stå i förbindelse med utrymningsvägar från bostäder i verksamhetsklass 3, och kontor i verksamhetsklass 1 som inte utgör integrerad del i industriverksamhet eller liknande. (BFS 2013:14).

Dessa föreskrifter tillför dock inte så mycket till vad som redan finns med i avsnitt 5:53, förutom att energilagring eventuellt kan falla in under samma riskkategori som pannrum, vilka redan har krav på egen brandcell. Sammanfattningsvis är följande vad BBR har att säga om energilagring i dagsläget; om ett energilagring medför en stor sannolikhet för uppkomst av brand och där en sådan kan ha stora konsekvenser, bör detta utrymme utformas som egen brandcell. Mycket är alltså upp till egentolkning och det kvarstår en hel del arbete för att byggreglerna skall hantera den växande trenden för dessa utrymmen i dagens samhälle.

Det tåls att nämna att Boverket ständigt följer utvecklingen i avseende till nya elsystem och kommer i framtiden medverka i referensgruppen till ett brandforskningsprojekt om nya elsystem².

2.2.2 Internationell lagstiftning

Internationellt sett finns det mer detaljerade lagstiftningar relaterat till energilagring innehållandes Li-jon-batterier, både inom bostäder och offentliga byggnader. Dessa kommer främst från, eller är inspirerade av USA, vilket då ansågs som det land man bör fokusera på. Vad som följer är endast en kort överblick då en mer detaljerad sammanställning av lagstiftningar ligger utanför rapportens avgränsningar.

USA är ett land som arbetat mycket med energilagring, där det redan finns säkerhetsstandarder, regler och förordningar sedan ett par år tillbaka (Blum & Long, 2016), där ett exempel är UL (Underwriters Laboratories). USA följer samtidigt den internationella IEC (International Electrotechnical Commission), vilken innehåller standarder som används av många länder. Dessa standarder/riktlinjer uppdateras ständigt för att hantera den snabba utvecklingen inom området, och mycket arbete utförs nu för att täcka in den nya generationen av energilagring innehållandes Li-jon-batterier. Hittills har de endast behandlat mer traditionella teknologier, till exempel bly-syra-batterier och nickel-kadmium-batterier.

² Johansson, Anders; Brandingenjör på Boverket, Karlskrona. 2019. Mailkommunikation 23 september. Diarienummer 6400/2018.

En del länder använder sig av dessa förordningar som grund för sina egna förordningar och standarder då de fungerar väl internationellt sätt (Blum & Long, 2016).

Säkerhetsstandarderna innehåller konstruktionskrav för energilager och täcker vanligtvis områden så som materialval, funktionella säkerhetskrav, elektriska säkerhetskrav och anslutningskriterier. Dessa reglerar också prestandaprovningar för energilager, vilka finns till för att säkerställa att det kan användas säkert under sin förutsatta livslängd. Prestandaprovningarna testar bland annat energilagrets funktion vid en mängd olika temperaturer, kortslutningar och miljöpåverkan så som vattenskador (Blum & Long, 2016).

Utöver säkerhetsstandarderna finns både internationella och nationella konstruktionsförordningar vilka reglerar bland annat brandsäkerheten i energilager, men innehåller samtidigt föreskrifter för både el och konstruktion. De viktigaste av dessa är NFPA 1 (National Fire Protection Association), National Electrical Code (NEC), International Code Council (ICC), International Building Code (IBC), International Residential Code (IRC) och International Fire Code (IFC). Förordningarna är många och inte helt lättolkade, och de kan ibland tala emot varandra, vilket Blum och Long (2016) tar upp i sin bok om energilagring (Blum & Long, 2016). Till exempel kräver inte IFC skydd för termisk rusning, medan NFPA 1 gör det, vilket kan leda till förvirring. Det är också oklart vilken typ av skydd som menas. Vidare så poängterar författarna problemet med att det finns många stater/kommuner som hamnar efter i att införa dessa lagstiftningar i takt med att de uppdateras (som följd av ny teknik), något som är ett problem även i Sverige.

Nedan presenteras en kort sammanställning vad ovan förordningar kräver av ett energilager innehållandes Li-jon-batterier i form av brandskydd. Vissa av dessa krav ställs dock endast på energilager vars vikt överskrider 1000 lb (cirka 450 kg). Vikten av energilagret fungerar således som en bestämmande faktor. Det finns dock olika metoder för att definiera och kategorisera energilager och batterier världen över (Blum & Long, 2016).

- Ett rökdetekteringssystem skall installeras i energilager vars vikt överskrider 1000 lb.
- Ett energilager vars vikt överskrider 1000 lb skall separeras från resten av byggnaden med konstruktion som upprätthåller sina brandtekniska egenskaper i minst 1 eller 2 timmar, beroendes på intilliggande verksamhet.
- I byggnader där krav finns på ett automatiskt vattensprinklersystem och ovanstående två punkter uppfylls (dock krävs ett automatiskt brandlarm i detta fall, inte ett rökdetekteringssystem), gäller inte längre detta krav för utrymmet i fråga.
- Ett energilager faller inte in under kategorin ”brandfarlig vara”, förutsatt att utrymmet möter vissa ventilationskrav. Li-jon-batterier kräver emellertid vanligtvis inte ventilation då de inte avger gaser under normala förutsättningar. Huruvida IBC och NFPA 1 skall behålla kravet på ventilation är för tillfället oklart.

3 Metod

För att kunna besvara frågeställningarna så utgjordes arbetsgången av olika delar. En litteraturstudie genomfördes för att studera tidigare erfarenheter och kunskap kring området. Till denna söktes det bland både nationell och internationell information. Därefter identifierades ett antal respondenter som bedömdes besitta relevant kunskap inom ämnet. Sedan genomfördes en intervjustudie där de aktuella respondenterna intervjuades utifrån en intervjuguide som togs fram för att få så god kvalitet som möjligt på resultatet. En riskbedömning utfördes sedan, åtföljt av en utökad verifiering och dimensionering av utvalda åtgärdsförslag, där utformningen grundades i resultaten från intervju- och litteraturstudien.

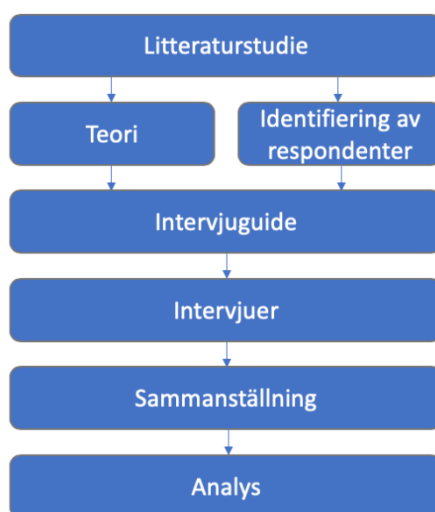
3.1 Litteraturstudie

Syftet med litteraturstudien var att samla in litteratur som berörde ämnet för att få en överblick och erhålla grundläggande kunskap. Det gav en nödvändig teoretisk bakgrund som varit viktig genom hela arbetet. Den teoretiska grunden var viktig för att kunna utforma relevanta intervjufrågor och utföra intervjuerna på ett korrekt sätt. Litteraturstudien har till viss del berört Li-jon-batterier i allmänhet; olika typer, dess funktion och uppbyggnad. Fokus har även legat på riskerna med batterierna, både enskilt och då de är sammankopplade i ett energilager. Studien har utgått ifrån vetenskaplig litteratur som har hittats via databaser så som LUBsearch och Google och tillhandahållits från RISE forskningsinstitut. Exempel på sökord som använts är Li-jon-batterier, batteritekniker, risker med Li-jon-batterier, batterilager, energilager, risker med energilager, samt deras motsvarigheter på engelska.

3.2 Intervjustudie

Energilagring med Li-jon-batterier är relativt nytt i Sverige och det är en växande teknologi som också förväntas bli mer och mer vanlig (Vetter & Rohr, 2014). Intresset är stort men eftersom området är nytt finns det en begränsad mängd dokumenterad information, och för att införskaffa kompletterande kunskap och åsikter valdes intervjustudie som metod. Syftet med intervjuerna var dels att ta reda på hur respondenterna ser på riskerna med energilagring, dels för att höra vilka brandtekniska åtgärder de anser vara mest lämpliga. En tanke med intervjuerna var att de också skulle kunna ge en indikation på hur framtida lagstiftning kan se ut. Intervjuerna kommer till viss del att behandla Li-jon-batterier och energilager mer generellt för att få en kunskapsöverblick och se hur mycket de olika respondenterna kan om ämnet. Detta har som delsyfte att kunna bedöma trovärdigheten på svaren som ges.

Inför intervjuerna fick respondenterna ta del av intervjufrågorna med avsikt att de skulle få en bättre förståelse för intervjuens struktur, samt för att de skulle kunna förbereda sig på vilka frågor som skulle beröras. Intervjuerna utfördes alla på samma sätt, med videosamtal över Skype. Figur 3 visar hur arbetsgången sett ut beträffande intervjustudien.



Figur 3: Översikt av arbetsgången gällande intervjustudien.

3.2.1 Respondenter

Målet var att samla kunskap och åsikter från olika delar av branschen för att erhålla en bred kunskapsbas till riskbedömningen. Tio olika respondenter med olika bakgrund valdes ut. Urvalsprocessen gick till så att ett mejl skickades ut till organisationerna där en förfrågan ställdes angående om de hade någon de ansåg besitta kompetensen vi sökte (vilket bland annat inkluderade god kunskap om Li-jon-batterier, energilagring och gällande lagstiftning). På så vis fick organisationerna själva välja ut den de kände var mest kunnig inom området, något som ansågs uppfylla kraven.

Förfrågan om intervju ställdes till flertalet räddningstjänster men då ämnet är relativt speciellt var det inte alla som ansåg sig ha tillräcklig relevant kompetens. Bra respons mottogs dock från ett antal olika personer. Däribland från två utav Sveriges största räddningstjänster, där två personer med kunskap och erfarenhet inom området intervjuades. Tre brandkonsulter från olika företag valdes ut eftersom de ansågs besitta väsentlig och aktuell kunskap. Två brandingenjörer på Volvo intervjuades eftersom det är ett företag som ständigt arbetar med utveckling av energilösningar innehållandes batterier (då framförallt stationära lösningar). Boverket är en myndighet som reglerar Sveriges byggregler, vilket gör dem mycket relevanta för denna rapport. En brandingenjör på Boverket som arbetat med frågan om energilager ansågs därför ha betydelsefull kunskap och valdes således ut som respondent. På motsvarande sätt motiverades en respondent från Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB). Sista respondenten blev en person som driver en informationssida på internet vid namn ”Utkiken.net”, vilket bland annat informerar om, och diskuterar kring brandskydd. Sidan riktar sig främst mot räddningstjänster. Nedan presenteras en sammanställd lista av respondenterna.

- Joakim Ilmrud, Räddningstjänsten Syd
- Jonas Olsson, Storgöteborgs Räddningstjänst
- Torkel Dittmer, Brandskyddslaget
- Jan Ottosson, WSP
- Mattias Arnqvist, FSD
- Kim Wikberg, Volvo Cars
- Andreas Johansson, Volvo Group Real Estate
- Anders Johansson, Boverket
- Anders Lundberg, MSB
- Per-Ola Malmström, Utkiken.net

3.2.2 Intervjuförberedelse

En intervjuguide togs fram som verktyg för att ge struktur på intervjuerna och för att säkerställa att relevanta frågor togs med. Under utformningen av intervjuguiden beaktades ett antal faktorer som var viktiga för att få så bra resultat som möjligt. I inledningen av varje intervju var det viktigt att informera om intervjuens syfte och att ge respondenten en motivering till att ge så utförliga svar som möjligt (Ekholm & Fransson, 1992).

Några av fördelarna med användningen av en intervjuguide är också att den begränsade tiden används så effektivt som möjligt samt att man får ett systematiskt resultat (Patton, 1987). Det fanns ett visst behov av struktur där svar på specifika frågor eftersöktes, men det fanns även en vilja att ge respondenterna frihet för att få ut så mycket som möjligt av intervjuerna. På grund av detta utformades intervjuerna på ett sätt som höll dem semi-strukturerade, med öppna frågor i en strukturerad och kontinuerlig ordning genom alla intervjuer. Intervjuguiden bygger på frågor som resoneras fram med bakgrundinformation taget från teorin. Nedan presenteras intervjuguidens huvudsakliga delar och struktur:

- **Inledning**
 - Presentera arbetet
 - Gå igenom förutsättningar
 - Kort beskrivning av vem respondenten är och dess yrkesroll
- **Li-jon-batterier**
 - Generellt om Li-jon-batterier
 - Hur respondenten har kommit i kontakt med risker gällande Li-jon-batterier
- **Energilagring**
 - Hur respondenten har kommit i kontakt med energilagring
 - Om dagens byggregler räcker för upprättande av energilager inom byggnader
- **Riskbild**
 - De största utmaningarna med energilager i byggnader
 - Hur bör de riskerna hanteras på bästa sätt
 - Passande skyddsmål
- **Brandtekniska åtgärder**
 - Respondentens syn på hur energilager bör regleras i BBR, eller annan lagstiftning
 - Var bör fokus ligga och vad bör minimikraven vara

Se Bilaga A, för den kompletta intervjuguiden.

3.3 Skyddsmål

För att kunna verifiera om risker är acceptabla eller ej behövs någon form av säkerhetsnivå att jämföra med. En vanligt förekommande term för detta är skyddsmål, men användandet av till exempel riskkriterier eller acceptanskriterier tillhör inte ovanligheterna. Skyddsmål underlättar även när riskanalysens resultat skall kommuniceras till beslutsfattare, vilka inte alltid besitter den kunskap som krävs för att begripa analysens omfattning. Personer med sådana positioner måste därför på ett effektivt sätt kunna ta till sig och förstå vad risken och dess konsekvenser innebär, vilket lättast görs genom att till exempel jämföra med ett skyddsmål de förstår (MSB, 2003).

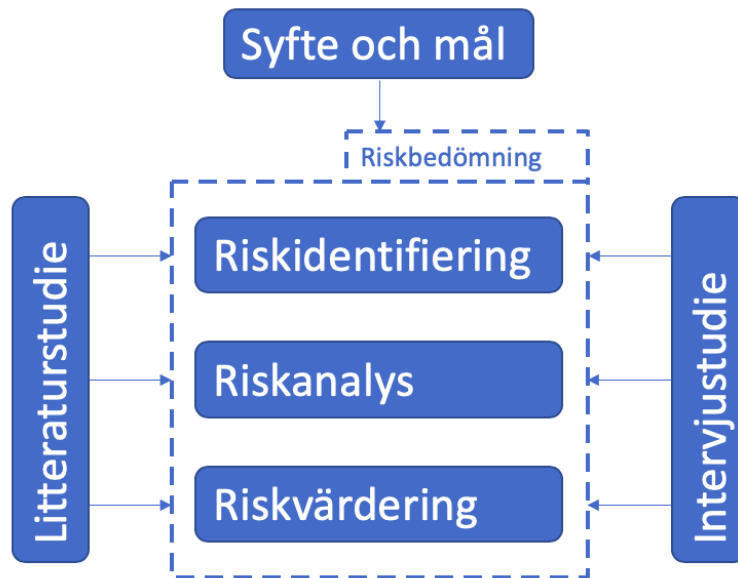
Byggbranschen är redan reglerad av en uppsjö av föreskrifter och standarder av olika slag, men eftersom energilager är relativt nytt och ej omfattas av dessa i dagsläget, ansågs det intressant att ta reda på vad branschen har att säga om skyddsmål relaterat till energilager. Denna fråga lyftes därför under intervjuerna.

3.4 Riskbedömning

Rapportens stomme utgörs av en riskbedömning vilket vanligtvis innehåller följande delar:

- Riskidentifiering
- Riskanalys
- Riskvärdering

Begreppet riskbedömning kan i olika sammanhang ha olika betydelse och omfatta en mängd skilda delar (MSB, 2003), men i denna rapport har processen ovan valts för att på bästa möjliga sätt uppnå arbetets mål och syfte. Som tidigare nämnts i rapporten ligger både litteratur-och intervjustudien till grund för riskbedömningen. Respondenternas uttalanden och åsikter kommer löpande refereras till, från och med riskidentifieringen och framåt. Se Figur 4 för en överblick av arbetsgången och rapportens huvudsakliga struktur. Den liknar den som SIS (2009). beskriver, om än lite anpassad till denna rapport



Figur 4: Schematisk bild som visar riskbedömningens arbetsgång, där litteraturstudien och intervjustudien bistår längsmed processen.

En kvantitativ riskbedömning ansågs ej genomförbar då det saknas relevant data relaterat till bränder i energilager under normala omständigheter. Mycket forskning görs inom området där allt från brandförlopp till gasutsläpp undersöks, men detta är under kontrollerade former i testanläggningar. Konsekvenser kan på detta vis kvantifieras men frekvenser blir väldigt spekulativa utan förankring i verkliga incidenter. En kvalitativ riskbedömning bedömdes därför vara den bäst lämpade metoden att arbeta utefter. Vidare syftar arbetet till stor del till att identifiera riskkällor och riskfyllda situationer, där en kvalitativ metod ofta anses vara tillräcklig för att erhålla tillfredställande resultat (MSB, 2003).

I kommande tre avsnitt presenteras den metod som använts för att erhålla resultatet som presenteras i kapitel fem.

3.4.1 Riskidentifiering

Metoden som använts för riskidentifieringen var en typ av grovanalys som grundar sig i litteraturen som bearbetats i litteraturstudien. Denna typ av analys syftar till att identifiera alla de risker som kan tänkas kräva en noggrannare utredning (Lackman, et al., 2010). Målet med riskidentifieringen var att få med ett så brett spektrum av risker som möjligt, men som fortfarande kunde förankras i ett antal olika rapporter/dokument. Även respondenternas uppfattning kring riskerna togs med i denna del då deras kunskap ansågs mycket relevant. Identifieringen har således haft en sammanställande funktion av de vanligast förekommande riskerna i litteraturen tillsammans med respondenternas synpunkter. Fokus i detta avsnitt har generellt legat kring riskerna med Li-jon-batterier och dess användning för att underbygga läsarens förståelse för ämnet.

3.4.2 Riskanalys

I detta avsnitt smalnades den generella riskidentifieringen av genom att förflytta fokus från endast Li-jon-batterier till energilager mer specifikt. De identifierade riskerna förflyttades på så vis in i byggnaden på ett naturligt sätt för noggrannare analys. När detta skedde genomfördes också en viss typ av gallring av riskerna, där endast de som ansågs vara relevanta för energilagring togs med i riskanalysen. Vidare så är det också i detta avsnitt som intervjustudien och dess resultat börjar användas mer frekvent. Respondenternas åsikter och uttalanden kring risker med energilagring innehållandes Li-jon-batterier refereras till löpande och jämförs på så vis med riskidentifieringen från litteraturstudien. Tanken är att de skall komplettera varandra och skapa en djupare analys kring de risker som kan tänkas vara de mest relevanta.

Metodikerna som använts har till stor del varit baserade på den som går att finna i *Svensk Standard SS-ISO 31000:2009*, samt den som förespråkas av Rausand (2011). De båda rekommenderar användandet av kvalitativa analyser och resonemang för att få fram sannolikhet och konsekvens när den tillgängliga informationen är otillräcklig för att genomföra en kvantitativ analys. Vidare så menar de att dessa kvalitativa analyser borde genomföras av människor som är insatta och har kunskap i ämnet, samtidigt som en så bred kunskapsbas som möjligt bör eftersträvas (Rausand, 2011). Riskanalysen bygger följaktligen framförallt på respondenternas åsikter och uttalanden, då dessa ansågs vara kunniga inom området.

3.4.3 Riskvärdering

Under riskvärderingen jämfördes risknivån som togs fram i riskanalysen mot de framtagna skyddsmålen. På så vis utvärderades riskernas sannolikhet och konsekvens för att se om de är tolerabla eller ej. Baserat på resultatet kunde sedan ett beslut tas om åtgärder behövdes för att minska antingen konsekvens eller sannolikhet, alternativt båda. Likväl kunde ett beslut innefatta att inga åtgärder behövdes för tillfället, eller att vidare analys krävdes. Risken är vanligtvis relativt låg i dessa fall (SIS, 2009).

3.5 Kompletterande verifiering och dimensionering

I detta avsnitt utfördes beräkningar för att verifiera och dimensionera ett fåtal av de åtgärder som tagits fram under riskvärderingen. Detta gjordes framförallt för de åtgärdsförslag som ansågs vara av en mer teknisk karaktär där resultatet kan fastställas mer tydligt.

4 Skyddsmål

Ett av målen med denna rapport var att stipulera möjliga skyddsmål för ett energilager med Li-jonbatterier inom en byggnad, som sedan skulle vägas mot riskanalysens utfall i riskvärderingen. Tanken var att identifiera de största problemområdena och formulera skyddsmål därefter, vilka kunde underlättat för framtida projektering/lagstiftning. Vidare så var avsikten att respondenterna skulle bistå med förslag och idéer gällande detta mål. Under intervjustudien framgick det tydligt att respondenternas svar relaterat till passande skyddsmål redan omfattades i vad som kan finnas i Sveriges Plan-och byggförordning (PBF) (2011:338). Anders Lundberg, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB), uttryckte följande relaterat till skyddsmål;

”Skyddsmål bör vara att människor skall kunna utrymma på ett säkert sätt innan kritiska förhållanden nås. Om man inför ett energilager i en byggnad skall inte människor utsättas för en större risk jämfört med innan³”.

Till samma fråga svarade Mattias Arnqvist (FSD) följande;

”Vid projektering av ett energilager kan ett lämpligt skyddsmål vara att säkerställa att en brand inte orsakar spridning av brand och brandgaser till andra utrymmen. Om man ska vara mer specifik kan en övre gräns på vilken tryckuppbyggnad som får ske inne i rummet vara passande, samt en lägsta tillåten kapacitet för ventilation⁴”.

Nästan samtliga respondenter formulerade liknande svar, där de i svepande drag uttryckte att det skall vara människors liv, säkerhet och hälsa som bör ligga i fokus för eventuella skyddsmål, utan att ge några alltför specifika förslag⁵. Somliga framhävde problematiken med giftiga gaser, andra pekade på vikten av säker utrymning, men andemeningen av dem alla mynnar ut i vad som redan finns skrivit i PBF, vilket inte är så konstigt då de alla jobbar utefter den varje dag.

Genom intervjustudiens kartläggning av möjliga skyddsmål visade det sig att de redan existerande ”Egenskapskrav avseende säkerhet i händelse av brand” i PBF utgjorde goda nog skyddsmål. De ansågs således passande att använda dessa, både på grund av vad som tolkats av respondenternas åsikter i frågan, men också på grund av deras generiska karaktär. De fem egenskapskraven listas här nedan (Plan- och byggförordning, 2011), med de mest relevanta fetmarkerade av författarna:

Egenskapskrav avseende säkerhet i händelse av brand

8§ För att uppfylla det krav på säkerhet i händelse av brand som anges i 8 kap. 4 § första stycket 2 plan- och bygglagen (2010:900) ska ett byggnadsverk vara projekterat och utfört på ett sätt som innebär att:

- 1. byggnadsverkets bärförmåga vid brand kan antas bestå under en bestämd tid,***
- 2. utveckling och spridning av brand och rök inom byggnadsverket begränsas,***
- 3. spridning av brand till närliggande byggnadsverk begränsas,***
- 4. personer som befinner sig i byggnadsverket vid brand kan lämna det eller räddas på annat sätt, och***
- 5. hänsyn har tagits till räddningsmanskapets säkerhet vid brand.***

Nummer 2, 4 och 5 är fetmarkerade då de på något sätt har berörts i större omfattning i antingen litteraturstudien eller intervjustudien. Dessutom är de tätt sammankopplade med de risker som

³Se Bilaga B10 (Anders Lundberg)

⁴Se Bilaga B3 (Mattias Arnqvist)

⁵Se Bilaga B

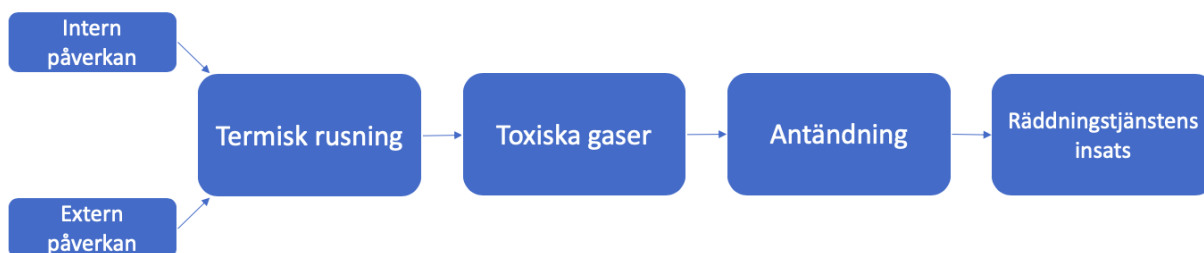
identifierats i riskidentifieringen. Vad gäller nummer 1 och 3 anses de ha liten relevans relaterat till energilager. Brandbelastningen når inte orimliga nivåer och utgör därför inget bärverksproblem för byggnader. Vidare så anses energilager vara en del av en byggnad vilket gör kravet gällande spridning till andra byggnadsverk irrelevant. Egenskapskrav ett och tre kommer således inte refereras till som skyddsmål vidare i rapporten. Egenskapskrav 2, 4 och 5 kommer sedan att användas i riskvärderingen då beslut skall tas om de identifierade riskerna är acceptabla eller ej, alternativt om riskreducerande åtgärder behövs.

5 Riskbedömning

Följande kapitel inleds med identifieringen av de generellt största riskerna med Li-jon-batterier. De riskerna med störst relevans för energilager analyseras sedan vidare i riskanalysen där fokus framförallt kommer ligga på tänkbara konsekvenser. Resultatet av riskanalysen jämförs sedan med skydds målen i riskvärderingen.

5.1 Riskidentifiering

I följande avsnitt presenteras vad som har identifierats som de största riskområdena relaterat till Li-jon-batterier i form av ett händelseförlopp. Detta förlopp, eller kedja, inleds med att en termisk rusning inträffar, vilket har identifierats som det största problemområdet relaterat till dessa batterier, på grund av intern eller extern påverkan (mer om dessa i nästa avsnitt). Detta i sin tur leder till att både giftiga och lättantändliga gaser bildas och släpps ut i det fria, varvid en antändning av dessa gaser kan inträffa. Det sista steget involverar räddningstjänstens insats och utmaningarna de ställs inför. Observera att de tre sista stegen fortfarande kan resultera i negativa konsekvenser även då förloppet inte fortskrider till nästkommande steg. Se Figur 5 för en överskådlig bild av händelseförloppet.



Figur 5: Översiktligt händelseförlopp av det identifierade händelseförloppet.

Anledningen till användandet av händelseförloppet är att det summerar riskbilden av Li-jon-batterier på ett övergripande sätt. Alla stegen är sammankopplade, men samtliga steg utgör samtidigt separata utmaningar för hur framtidens hantering av dessa batterier skall gå till. Dessutom underlättar förloppet identifieringen av barriärer mellan de olika stegen, vilka kan förhindra eller minska dess konsekvenser och/eller sannolikhet. Den ger också en bred utgångspunkt för vidare analys i riskanalysen. Riskidentifieringen grundar sig i både grovanalysen från litteraturstudien samt respondenternas ställningstaganden under intervjuerna.

5.1.1 Termisk rusning

Temperaturen kan öka okontrollerat i ett Li-jon-batteri genom en kemisk process som kallas termisk rusning, vilket kan leda till att farliga gaser släpps ut i omgivningen, brand och i värsta fall explosion (Amon, et al., 2012). Denna process har identifierats, av majoriteten av respondenterna, som källan till riskerna med Li-jon-batterier⁶, just på grund av att den är orsaken till ovan nämnda händelseförlopp. Utan risken för termisk rusning skulle dessa batterier kunna likställas med till exempel bly-syra-batterier, vilka anses säkrare i många anseenden (däremot finns andra risker som följer med bly-syra-batterier).

⁶Se Bilaga B

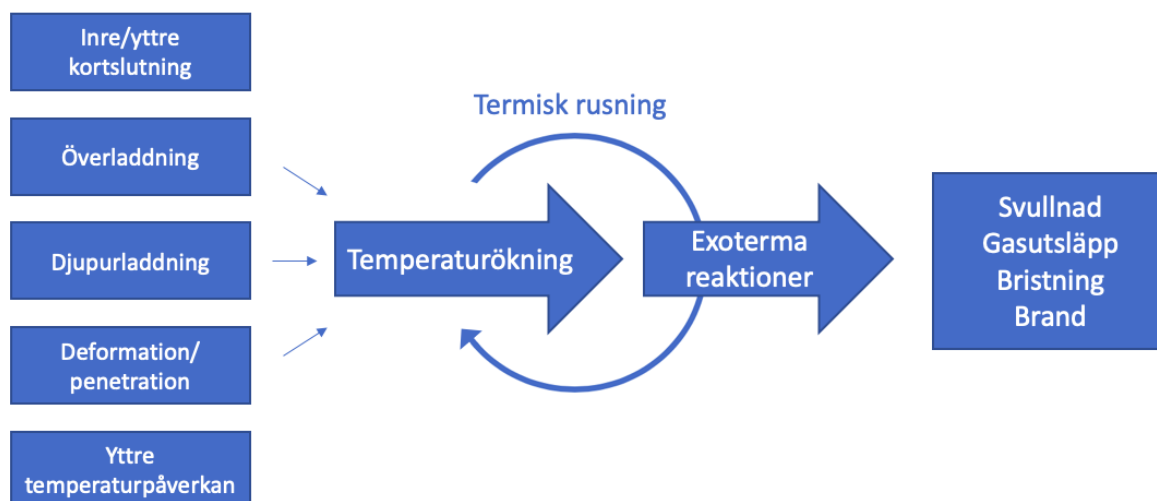
Termisk rusning kan initieras då battericellen skadas på något sätt, till exempel genom att det tappas i marken eller får arbeta utanför sitt optimala arbetsintervall, vilket kan orsaka en kortslutning. Temperaturen inuti batteriet kan då höjas, antingen temporärt, men i vissa fall kan den också fortsätta att öka. I fall att temperaturen fortsätter att stiga, börjar elektrolyten förångas och bildar då gaser vilket ökar trycket i cellen. Detta sker vanligtvis vid temperaturer runt 75 °C (Andersson, et al., 2019). Temperaturen kan då öka ytterligare vilket resulterar i att separatorn mellan elektroderna smälter och exoterma reaktioner påbörjas då mellan de båda elektroderna och elektrolyten, vilket leder till termisk rusning. Gaserna som produceras från elektrolyten och de exoterma reaktionerna måste ventileras ut för att inte skada cellen eller batteriet ytterligare (genom att cellhöljet spricker), vilket kan göras via inbyggda säkerhetsventiler eller genom att för avsikt försvagade delar av batteriet brister (Larsson, 2017) (denna metod används enbart för pouchceller). Om dessa säkerhetsmekanismer ej finns på plats finns det en risk att batteriet exploderar på grund av trycket. Att ventileras ut gaserna är dock endast en temporär lösning på problemet som blott har en fördröjande effekt.

När denna process har satts igång är den mycket svår att få stopp på, temperaturen fortsätter att stiga och gaserna som läcker ut ur batteriet riskerar att antändas av batteriet självt, alternativt av externa faktorer som till exempel annan elektrisk utrustning (Andersson, et al., 2018). Om gaserna antänds kan den termiska rusningen propagera snabbare mellan cellerna i batteriet, eller mellan olika moduler/batteripack genom värmeöverföringen från flammen (Andersson, et al., 2018). Den termiska rusningen kan dock spridas även om antändning inte sker, genom värmen som alstras, beroendes på hur cellerna/modulerna/batteripacken är designade.

Mycket av problematiken kring denna kemiska process ligger i att den är självförsörjande vad gäller alla de ingående kraven för att en brand skall kunna fortlöpa, nämligen värme (energi), brännbart material och syre. De kemiska reaktionerna är exoterma, vilket genererar värmen som behövs, samtidigt som den organiska elektrolyten i dessa batterier är brännbar, katoden avger också syre när den sönderfaller (Andersson, et al., 2019). Alla tre delar i brandtriangeln är således uppfyllda.

Ytterligare ett problem med denna process är att den kan ske mycket snabbt, och resultera i att battericellen exploderar med en jetflamma som konsekvens, men också mycket långsamt. En eventuell skada kan sätta igång processen som ökar stegvis över en period på timmar och ibland dagar. Ett batteri som till synes ser oskadat ut kan således byggas in i ett energilager eller en bil för att ett par dagar senare hamna i termisk rusning och utsätta personer för fara. Likartade dokumenterade fall existerar relaterat till elbilar (Kong, et al., 2018). Efter en eventuell krock kan bilen skickas in på service för kontroll, där batteriet sett ut att vara i fungerande skick och godkänts som oskadat, för att en tid senare börja brinna i ett garage eller mitt på en väg.

Orsakerna till att en battericell uppnår en tillräckligt hög temperatur för att en termisk rusning skall initieras är många. Det kan bero på bland annat överladdning, djupurladdning, intern eller extern kortslutning, och yttre värmepåverkan. Se Figur 6 för en överskådlig bild av hur olika interna och externa händelser kan leda till denna process.



Figur 6: Schematisk bild som visar vilka faktorer som kan leda till termisk rusning, och dess konsekvenser. Omarbetad efter förlaga ur Sandén & Wallgren (2014).

Nedan förklaras händelserna som kan initiera en termisk rusning mer ingående.

Kortslutning (intern/extern)

En kortslutning uppstår om en koppling mellan batteriets positiva och negativa elektrod har en låg resistans. Då kan en hög ström passera igenom batteriet och på så vis ladda ur det väldigt fort, vilket i sin tur ökar dess temperatur (Amon, et al., 2012), eventuellt till den nivån som krävs för att inleda en termisk rusning.

När batterier utan skydd över dess två poler förvaras i metallbehållare kan polerna kopplas ihop och kortslutning kan uppstå. Ett annat exempel på när extern kortslutning kan ske är när en elektrisk apparat nedmonteras och ett metallverktyg leder strömmen mellan polerna. Produktionsfel kan göra att små metalliska litiumpartiklar (även kallat dendriter) ansamlas i battericellen och när batteriet sedan laddas upp kan dessa partiklar orsaka intern kortslutning (Long & Blum, 2016).

Yttre påverkan i form av kross, deformation eller penetration kan leda till både extern och intern kortslutning genom att batteriet utsätts för en smäll eller penetreras av ett annat föremål. Om smällen är kraftig så kan en omedelbar kortslutning uppstå medan en mindre smäll kan leda till kortslutning i ett senare skede, efter batteriet har genomgått flertalet laddningscykler (Long & Blum, 2016). Om ett batteri inte hanteras tillräckligt varsamt eller om dess skydd inte är tillräckliga kan ett batteri utsättas för många olika typer av yttre påverkan. Det kan exempelvis vara om ett batteri tappas i marken, om det blir påkörnt av en truck eller om det träffas av ett fallande föremål.

Överladdning

Om ett Li-jon-batteri laddas med högre spänning eller ström än vad det är lämpat för kan det bli överladdat. Överladdning följs utav reaktioner i batteriets anod och katod som kan leda till att temperaturen i battericellen höjs, vilket i sin tur kan initiera en termisk rusning (Long & Blum, 2016). Högre grad av överladdning resulterar i större risk för termisk rusning. En kraftfull överladdning kan leda till omedelbar termisk rusning medan mindre överladdningar väldigt sällan är tillräckliga för att skapa rätt förutsättningar för att sätta igång processen. Dock så kan en period av upprepade mindre överladdningar på samma battericell skada batteriet i sådan utsträckning att det finns en risk för termisk rusning på sikt (Long & Blum, 2016).

Orsaker till att överladdning sker kan bero på design- eller tillverkningsfel där det inbyggda skyddet, även kallat ”redundant overcharge protection mechanism”, mot överladdning inte fungerar som det ska. Denna funktion styrs av BMSen, vilket övervakar batteriets funktion och hälsa, se avsnitt 2.1.2 för mer detaljer. Laddning med manuellt inställda spännings- och strömnivåer kan även leda till överladdning om de ställs in fel (Long & Blum, 2016).

Djupurladdning

Det finns egentligen två former av djupurladdning; den ena är att man tömmer batteriet förhållandevis långsamt till en mycket låg nivå, den andra är att batteriet laddas ur väldigt snabbt, på gränsen till kortslutning. Vid djupurladdning kan elektroderna ta skada, vilket resulterar i att litiumpartiklar ansamlas i battericellen under nästa uppladdningscykel. Denna interna skada kan sedan utvecklas under en tid för att sedan leda till termisk rusning. Många batterier är installerade med ett skydd som gör att batterierna endast blir urladdade till en viss gräns (vilket sköts av BMSen), men det är inte alltid möjligt att förhindra det då detta skydd kan vara skadat eller felfungera. Om ett batteri har laddats ur till sin lägre säkra gräns och sedan står oanvänt under en längre tid, kan det över tid bli helt urladdat och på så sätt skadas vid nästa uppladdning (Long & Blum, 2016).

Yttre temperaturpåverkan

Den rekommenderade arbetstemperaturen för ett Li-jon-batteri är mellan -20 och +50 °C, beroendes på vilken elektrolytlösning som används (mindre intervall förekommer). Om batteriet får arbeta i högre eller lägre temperaturer än sitt optimala intervall kan det ta skada vilket kan leda till termisk rusning i battericellen (Amon, et al., 2012). BMSen kan till viss del förhindra detta med hjälp av kylande åtgärder, men endast om temperaturen håller sig relativt nära gränserna. Dock skall BMSen först och främst se till att batteriet inte används utanför sitt optimala temperaturintervall. Om batteriet eller omgivningen (i fallet av en närliggande brand) når kritiska temperaturer, vilket kan ligga mellan 70–250 °C, kan de kemiska processerna som initierar en termisk rusning påbörja. Processen är då mycket svår att stoppa. Det har också visat sig att vid mycket låga temperaturer kan elektrolytlösningen frysa och expandera, vilket kan orsaka sprickor i batteriet. När sedan temperaturen höjs och elektrolytlösningen blir till vätska igen, kan den läcka ut ur battericellen och eventuellt skada närliggande celler (Amon, et al., 2012).

5.1.2 Toxiska gaser

Den andra mycket omdiskuterade risken med Li-jon-batterier är de giftiga gaserna som produceras när en battericell hamnat i termisk rusning. I vissa sammanhang anses konsekvenserna av denna risk vara större i jämförelse med skadan ett eventuellt brandförlopp kan åstadkomma, speciellt då i mindre utrymmen som exempelvis ett energilager inomhus eller ett flygplan (Larsson, et al., 2017). Detta på grund av att de farliga gaserna kan nå högre koncentrationer i mindre rumsvolymer och göra miljön mycket toxisk. De brännbara gaserna utgör ingen direkt fara för människor så länge de inte antänds, observera dock att de kan ansamlas i mindre utrymmen för senare antändning. De giftiga gaserna kan orsaka skada på människor sekunden battericellen brister och de läcker ut i omgivningen. Ett exempel på detta är händelsen som ägde rum i Malmö den 31 oktober 2018, där en man under en kort period andades in röken från ett elcykelbatteri som hade börjat brinna i mannens hus. När sjukvårdspersonalen fick höra att det gällde ett Li-jon-batteri fördes mannen direkt till sjukhus med ambulans. På vägen till sjukhuset började mannen få kraftiga hostningar och suddig syn, och fick sedan ligga i respirator i två dygn. Tre månader senare hade mannen fortfarande besvär med värk och migrän (Malmquist, 2019).

Flertalet rapporter har konstaterat förekomsten av giftiga koncentrationer av hälsofarliga gaser med hjälp av förbränningstester av Li-jon-batterier. Exempel på dessa är; *Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires* (Larsson, et al., 2017), *Fire Tests on E-vehicle Battery Cells and Packs* (Sturk, et al., 2015), och *Lithium-ion Battery Safety - Assessment by Abuse Testing, Fluoride Gas Emissions and Fire Propagation* (Larsson, 2017), för att nämna några. Gaserna kan både vara organiska och antändliga, så som metan och etan, men också oorganiska (vilka oftast skapas av förångad

elektrolytlösning när batteriet når högre temperaturer). Vid förbränning av Li-jon-batterier har det visat sig att många olika gaser bildas i en varierande mängd koncentrationer, inkluderat gaser utan känd toxicitetnivå. Bland de giftigaste och mest omdiskuterade tillhör vätefluorid (HF), samt till viss mån fosforylfluorid (POF₃) (Larsson, et al., 2017). Det är i huvudsak de organiska lösningsmedlen i elektrolyten tillsammans med det mest frekvent förekommande saltet litiumhexafluorofosfat (LiPF₆) som är källan till dessa mycket hälsofarliga gaser vid förbränning (Sturk, et al., 2015). POF₃ har dock endast påvisats i ett fåtal rapporter, och i mycket varierande koncentrationer då det är en väldigt reaktiv gas. Eftersom toxiciteten för POF₃ är relativt okänd och dess förekomst omdiskuterad (Larsson, et al., 2017), kommer störst fokus läggas på vätefluorid, vilket anses som den största risken i dagsläget.

Vätefluorid är en mycket giftig gas som kan orsaka allvarliga frätskador på hud, ögon och slemhinnor i små koncentrationer. Den kan även orsaka dödsfall vid inandning, förtäring eller vid omfattande hudkontakt. Vanliga symtom är sveda, irritation, andnöd, kramper, kräkningar och magblödning. Vid kontakt med vatten (exempelvis svett på huden) bildar denna gas fluorvätesyra vilket är en mycket starkt frätande och giftig syra. Denna syra binder till kalcium och magnesium och rubbar saltbalansen i kroppen, vilket kan leda till att vissa organ slås ut helt, så som hjärta, lungor och njurar. Symtomen kan i alla exponeringsfall vara fördröjda vilket kan försvåra första hjälpen i vissa situationer (AGA, 2017). Detta är även ett väl omdiskuterat riskområde för räddningstjänster.

5.1.3 Antändning

De gaser som produceras inuti battericellen vid termisk rusning kan orsaka att höljet till batteriet spricker, eller i vissa faller exploderar, på grund av det förhöjda trycket. De toxiska och brännbara gaserna strömmar då ut i det fria med hög hastighet. Om dessa gaser då antänds kan en jetflamma uppstå och orsaka stor skada på sin omgivning, till exempel möbler eller elektrisk utrustning. Jetflamman kan pågå under en förhållandevis lång tid, och är som tidigare nämnts, mycket svårsläckt. Även då säkerhetsventilerna fungerar som de ska finns en risk för att de gaser som ventileras ut antänds av externa källor. Antändningskällor kan bland annat vara annan elektrisk utrustning, bildelar i rörelse och öppna flammor. Vidare kan en eventuell explosion av battericellen skapa gnistor vilket kan antända gaserna ögonblickligen. Alternativt kan batteriet självantända de brännbara gaserna då temperaturen stigit tillräckligt högt på grund av den termiska rusningen.

I fallet då antändning inte sker i samband med att battericellen spricker/exploderar, kan gaserna ansamlas i stängda utrymmen. Risken ökar då för att de brännbara gaserna når en koncentration som är antändlig i utrymmet, vilket kan resultera i en explosion vid kontakt med en tänkbar antändningskälla. En sådan explosion kan orsaka stor skada på både egendom och människor.

5.1.4 Räddningstjänstens insats

Mycket oro har cirkulerat i räddningstjänstkreter kring effekterna av de hälsofarliga gaser som avges då Li-jon-batterier brinner, framförallt vätefluorid (Andersson, et al., 2019). Flertalet av respondenterna har även uttryckt sympatiserande ställningstaganden i frågan⁷. Brandmän hanterar allehanda bränder varje dag där de känner till förbränningsprodukternas skadliga effekter och hur de på ett effektivt sätt kan skydda sig emot dem. Bränder i Li-jon-batterier är annorlunda då det produceras vätefluorid, en gas som räddningstjänstens larmställ inte är gjorda för att motstå. Många räddningstjänster följer därför i dagsläget det råd som går att finna på Utkiken.net (2017), vilket lyder att man ej bör gå in i en byggnad innehållandes Li-jon-batterier förutom i livräddande syfte.

Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI) har på uppdrag av MSB gjort en studie kring brandmännens kläder där det visade sig att larmställ med membran kan stå emot denna typ av gas i cirka 20 minuter⁸. Detta resultat var fördelaktigt i jämförelse med tidigare studier. En av respondenterna, Per-Ola Malmquist, brandingenjör och grundare av Utkiken.net, ser dock brister med denna studie. Han menar

⁷ Se Bilaga B

⁸ Se Bilaga B9 (Per-Ola Malmquist)

att de endast kollat på textilernas genomsläpplighet och inte larmstället som helhet. Brandmännen är de som kommer vara först på plats vid denna typ av olyckor vilket gör att de bör ha korrekt utrustning och skydd för att minimera risken att utsättas för skada.

Som följd av att energilager för tillfället inte är reglerade i Sverige kan de placeras vart som helst inom en byggnad. Detta har identifierats av många respondenter som ett stort problemområde, vilket om något bör regleras⁹. Man talar om helt andra risker om det placeras i källarplan, gentemot på taket, menar Per-Ola Malmquist och Jonas Olsson¹⁰. Det saknas också riktlinjer för hur skyltning/märkning bör gå till inom detta område. Räddningstjänsten bör förvarnas att byggnaden innehåller ett energilager med Li-jon-batterier innan en insats påbörjas¹¹.

När väl en termisk rusning har initierats är processen mycket svår att avbryta, och i många fall gäller det bara att förminska brandens konsekvenser samtidigt som man låter bränslet brinna ut. Även om själva branden släcks med exempelvis vatten, så fortlöper de exoterma reaktionerna inuti batteriet, vilket höjer temperaturen ytterligare, samtidigt som brännbara gaser produceras. Detta kan i sin tur leda till en återantändning av batteriet genom kontakt med en gnista eller närliggande glödande material (Amon, et al., 2012). Jonas Olsson, brandingenjör och insatsledare för Räddningstjänsten Storgöteborg, berättar om en insats i en byggnad där ett elcykelbatteri hade börjat brinna i hallen i en lägenhet. När brandmännen trots de släckt elden i batteriet och gått vidare in i lägenheten, återantände batteriet och orsakade ett slangbrott¹². Risken för återantändning bör därför beaktas vid släckinsatser samt vid hantering av redan skadade batterier.

5.2 Riskanalys

I följande avsnitt analyseras de risker som identifierats i riskidentifieringens framtagna händelseförlopp. Här smalnas även den generella riskidentifieringen av genom att förflytta fokus från riskerna med Li-jon-batterier till riskerna med energilagring. Riskerna flyttas på så vis mentalt in i byggnaden inför detta avsnitt.

5.2.1 Termisk rusning och energilager

Den kemiska process som kallas termisk rusning och processerna som föregår den har sedan innan identifierats som de dominerande källorna till riskerna med Li-jon-batterier. Vid initiering, antingen med extern eller intern påverkan, produceras farliga gaser som kan leda till negativa konsekvenser för människors säkerhet och hälsa. Den termiska rusningen är alltså den huvudsakliga orsaken till de konsekvenser som presenterades i riskidentifieringen. Dessa konsekvenser och deras följdkonsekvenser samt sannolikheter kommer att analyseras mer ingående i riskanalysen, men eftersom den termiska rusningen anses vara en orsak, och inte en konsekvens, läggs mindre fokus på denna. Det existerar även risker med Li-jon-batterier även utan den termiska rusningen. Det är en exoterm process som ökar sannolikheten för de identifierade riskerna, men många av konsekvenserna hade funnits ändå. Sammantaget kan det tolkas som att analysen av termisk rusning är uppdelad i tre delar; giftiga gaser, antändning och räddningstjänstens insats.

Rapportens fokus ligger heller inte kring batterierna i sig, utan utrymmet som de placeras i och hur detta skall projekteras för att minska konsekvenserna av en eventuell brand. Vad som kan förbättras mer tekniskt inuti ett batteri för att förhindra att en termisk rusning inträffar ansågs således ligga utanför denna rapportens ramar. Den tekniska kunskapen hos författarna bedömdes också för låg för att kunna ge relevanta förbättringsförslag till hur Li-jon-batterier skulle kunna utvecklas. Det existerar dessutom redan inbyggda skyddssystem i batterierna i dagsläget, till exempel CID, PTC och BMS, vilka tillsammans ger batteriet flera säkerhetsnivåer. CID och PTC, fungerar som engångssäkringar som

⁹ Se Bilaga B

¹⁰ Se Bilaga B9 (Per-Ola Malmquist) och Bilaga B5 (Jonas Olsson)

¹¹ Se Bilaga B2 (Torkel Dittmer)

¹² Se Bilaga B5 (Jonas Olsson)

aktiveras vid kortslutningar och vid för höga tryck inuti battericellen (Battery University, 2019). Om dessa skulle felfunktionera finns det andra skyddsåtgärder som BMSen kan aktivera, se avsnittet om Batterisystem för mer detaljer.

Batterisäkerheten är i ständig utveckling där forskning tar fram nya metoder för att göra framtidens batterier så säkra som möjligt. Eftersom ett batteri består av många olika delar finns det mycket förbättringar som kan göras på olika områden. Ett exempel är elektrolyten, vilken är organisk och brännbar i dagens Li-jon-batterier. Forskning har genomförts med målet att hitta ej brännbara men även självkylande elektrolyter. Forskningen har varit framgångsrik, men tekniken behöver fortsatt forskning för att kunna användas i kommersiella batterier (Chawla, et al., 2019). Effektivare och mer tillförlitliga BMSer är också något som utvecklas, exempelvis genom fler och känsligare sensorer inom batteriet eller energilagret (Larsson, 2017).

Då det redan existerar åtgärder under utveckling för själva batteritekniken, i kombination med rapportens vinkling, ansågs det mer givande att lägga mer fokus på vad som eventuellt kan förbättras byggnadstekniskt för energilagring. I och med att konsekvenserna av en termisk rusning analyseras kommer åtgärdsförslagen minska dess skadliga effekter relaterat till energilagring inom byggnader.

5.2.2 Analys av toxiska gaser

Ett Li-jon-batteri kan vid termisk rusning frigöra många olika sorters gaser genom antingen kontrollerad ventilering eller genom att batterihöljet spricker, vilka kan påverka människor i omgivningen. Som tidigare beskrivet är ett antal av dessa gaser bevisat toxiska men det existerar fortfarande mycket oklarheter kring dem, samt vad de har för skadliga effekter på oss människor. Av de gaser som släpps ut är vätefluorid den gas som samtliga respondenter¹³ uppmärksammat som den största hälsofaran för människor. Vätefluorid har, som beskrivet i avsnitt 5.1.2, mycket skadliga effekter på människor, däribland frätskador och invärtes blödningar, men i värsta fall kan den även vara dödlig vid förtäring, hudkontakt eller inandning i stora nog koncentrationer.

Man bör skilja mellan gasen vätefluorid och vätskan fluorvätesyra, vilket bildas när denna gas löses upp och binder till vatten. Fluorvätesyra kan exempelvis bildas då vätefluorid kommer i kontakt med svett på huden, vilket kan ge svåra konsekvenser för utrymmande människor och räddningspersonal. Dessa ämnen ger inte alltid akuta toxiska problem utan kan ge upphov till fördröjda effekter så som benskörhet och njursvikt (AGA, 2017) Detta gör att gaserna utgör en fara även i andra fall utöver inandning och det är något som vanliga människor kanske inte känner till och därmed omedvetet utsätter sig för vid en potentiell utrymning¹⁴, alternativt vid underhåll av ett energilagring. Att personer omedvetet utsätter sig för utsläppta toxiska gaser kan också bero på att de är svåra att upptäcka (även då de har en irriterande lukt) till skillnad mot exempelvis brandgaser som har en välkänd lukt. För närvarande regleras inte hur dessa utrymmen bör märkas/skylltas och människor i byggnader kan således besitta bristande kunskap kring riskerna med energilagring vid brand eller felanvändning (detta påverkar även räddningstjänstens insats vilket tas upp längre fram).

Om ett batteri i ett energilagring på något vis skadats/fallerat och initierat en termisk rusning bland dess celler kan stora mängder toxiska gaser frigöras. Forskning har visat att sammankopplade battericeller producerar mer vätefluorid per cell jämfört med om de vore fristående eller ihopkopplade med färre celler (Sturk, et al., 2015). Dessa gaser kan då läcka ut ur rummet genom springor och andra öppningar och sprida sig till närliggande utrymmen i byggnaden, och på så sätt skapa en farlig miljö att vistas i. Om angränsande utrymmen är små blir koncentrationerna högre av de utsläppta gaserna. Det kan därför innebära allvarliga konsekvenser att placera ett energilagring i exempelvis en källare, som ofta består av smala gångar och mindre utrymmen där gaser lättare ansamlas. På liknande sätt kan en utrymningsväg försämrats av giftiga gaser om ett energilagring placeras utan vidare eftertanke, exempelvis i en lobby.

¹³ Se Bilaga B

¹⁴ Se Bilaga B2 (Torkel Dittmer)

Människor i byggnaden kommer kunna använda utrymningsvägen men lida konsekvenserna av att de passerat toxiska gaser på vägen ut. Exponeringstiden kan vara mycket kort för att erhålla allvarliga skador av vätefluorid och fluorvätesyra. Ytterligare en konsekvens av att energilagret för tillfället får placeras vart som helst, exempelvis i ett förråd, är att människor i byggnaden kan utsättas för ventilerade toxiska gaser om de skall använda utrymmets andra funktioner.

5.2.3 Analys av antändning

När en termisk rusning har uppstått i en battericell produceras brännbara gaser som antingen ventileras ut genom säkerhetsventiler, eller släpps ut då batterihöljet spricker. Dessa gaser kan antändas genom antingen en extern källa eller genom stigande värme som genereras i battericellen (Andersson, et al., 2019). Ett vanligt förekommande fenomen som då kan inträffa är den jetflamma som bildas då antända gaser rusar ut ur batteriet med hög hastighet. Detta kan leda till allvarliga konsekvenser i ett energilagret vilket vanligtvis innehåller flera batteripack som tillsammans utgörs av en stor mängd battericeller. Jetflamman kan mycket snabbt värma upp närliggande battericeller (men också batteripack/moduler, beroendes på hur energilagret är uppbyggt), och på så sätt sprida den termiska rusningen till andra delar av energilagret. Då fler battericeller hettas upp och antänds kan processen snabbt eskalera tills att majoriteten av batterierna står i brand. En eventuell antändning påskyndar således spridningen av en termisk rusning till närliggande celler avsevärt, och kan på så sätt göra större skada snabbare.

Utöver den värme som kan genereras i ett Li-jon-batteri under en termisk rusning är processen även självförsörjande gällande brännbart material och syre, vilka tillsammans utgör ett grundläggande problem eftersom batteriet i sig skapar förutsättningar för antändning. Mattias Arnqvist och Joakim Ilmrud, brandingenjörer på FSD respektive Räddningstjänst Syd, lyfter problemet kring att det inte behövs någon extern syretillförsel för förbränningen. Om en brand skulle uppstå i ett energilagret med Li-jon-batterier och utvecklats till den punkt då en normal brand hade blivit ventilationskontrollerad, hade branden troligtvis kunnat fortsätta just på grund av den termiska rusningens förmåga att själv producera syre under processen¹⁵. Det saknas dock forskning kring hur mycket syre som egentligen produceras vilket gör det svårt att säga hur länge branden hade kunnat fortlöpa utan extern syretillförsel. Syreproduktionen skiljer sig också beroendes på vilken typ av batteri och vilken typ av kemi som används (Ping, et al., 2015). Effekttutvecklingen från den termiska rusningen i kombination med produktionen av syre kan således resultera i mycket höga temperaturer även i ventilationskontrollerade utrymmen. Branden kan då lättare sprida sig till närliggande material i utrymmet (vad som får placeras intill ett energilagret regleras ej i dagsläget). Om energilagret inte är placerat i en egen byggnad eller brandcell, och angränsar till andra utrymmen innehållandes brännbart material, kan det få stora konsekvenser då branden kan spridas inom byggnaden.

I fallet då omedelbar antändning uteblir kan energilagret eller närliggande utrymmen fyllas av de producerade gaserna. Även om det för tillfället inte råder någon brandfara kan detta leda till förutsättningar för en deflagration då gaserna når en antändlig koncentration i utrymmet. Faran ligger då latent tills exempelvis en person använder utrymmet och orsakar en gnista vilket antänder de ansamlade gaserna. Energin som krävs för att antända förblandade gaser kan vara mycket liten, för metan är den cirka 0,3–1,0 mJ (Bengtsson, 2013). Vid antändning av en välblandad blandning av denna gas kan tryckuppbyggnaden bli upp till 8 bar i slutna utrymmen. En sådan explosion kan orsaka stor skada på byggnaden och människorna i den då ingen normalt konstruerad byggnad kan stå emot ett sådant tryck (Bengtsson, 2013). Om energilagret då är placerat i källaren kan det leda till rasrisk av närliggande delar av byggnaden. Projekttilskador kan vara en annan konsekvens om det istället hade placerats i markplan, till exempel bredvid en gångväg. Denna storlek på tryckuppbyggnad är dock mycket sällsynt då det oftast finns håligheter som fungerar som tryckavlastning eller mindre tåliga byggnadssegment som brister innan detta tryck nås. Sannolikheten för att rätt förutsättningar skall nås för en sådan explosion anses dock väldigt små. En termisk rusning måste inträffa och fortlöpa under en

¹⁵ Se Bilaga B3 (Mattias Arnqvist) och Bilaga B1 (Joakim Ilmrud)

viss tid för att fylla ett utrymme med brännbara gaser, som sedan skall antändas. Dessutom skall detta ske utan att någon hinner felrapportera det skadade batteriet.

Om en batteribrand i ett energilager släcks så finns risk för återantändning på grund av de kemiska reaktionerna i batteriet. Detta kan leda till samma konsekvenser som tidigare nämnts i detta avsnitt då hela processen startas om och det kan också få konsekvenser för släckningsarbetet, vilket det står mer om i avsnittet relaterat till räddningstjänstens insats.

5.2.4 Analys av räddningstjänstens insats

För att räddningstjänsten skall kunna göra en så effektiv och riskfri insats som möjligt måste de få så mycket information som möjligt redan innan insatsen påbörjas (MSB, 2015). Detta kan exempelvis handla om var det brinner eller vad det är som brinner. En brand kan således spridas till ett energilager och förvärra brandförloppet under en potentiell insats, utan att räddningstjänsten hade kännedom om risken. I dagsläget saknas riktlinjer för märkning/skyltning av energilager. Anders Lundberg, MSB, konstaterar att det existerar mycket få detaljerade regler kring detta område, vilket gör att det uppstår osäkerheter i projekteringsfasen¹⁶. Energilager kan därför planläggas på många olika sätt. Räddningstjänsten kan således gå in i en byggnad ovetandes om att det innehåller ett energilager med Li-jon-batterier och på så sätt exponeras för vätefluorid och andra skadliga gaser, samt ett värre brandförlopp än vad som från början antogs. Dessutom kan de välja fel typ av skydd och släckmedel vilket försämrar deras insats.

Majoriteten av respondenterna anser att byggreglerna som gäller idag relaterat till energilager inte underlättar insatsarbetet för räddningstjänsten, utan snarare försvårar det¹⁷. Detta på grund av att det saknas regler hur dessa utrymmen skall utformas och var de ska placeras inom byggnader, uttrycker Torkel Dittmer och Mattias Arnqvist¹⁸. Räddningstjänstens insats kommer således se annorlunda ut beroendes på energilagrets placering. Detta kan medföra komplikationer för räddningstjänsten då det blir svårt att utveckla standardiserade insatser för denna typ av utrymme. Insatsvägen kan bli mycket klurig om energilagret är placerat långt in i byggnaden på exempelvis källarplan, uttrycker Anders Johansson, Boverket¹⁹. Om räddningstjänsten måste leta sig fram till utrymmet kan exponeringen för brand och rök öka, speciellt i trängre platser som källargångar. Om istället energilagret hade placerats på taket, eller i markplan med direkt åtkomst till det fria hade konsekvenserna blivit betydligt mindre. Brandrökens skadliga effekter hade här kunnat undvikas på ett bättre sätt samtidigt som insatsen hade blivit mer överskådlig från utsidan. En ogenomtänkt placering av ett energilager kan således resultera i att brandmän, och andra, utsätts för onödiga risker och på så sätt kan konsekvenserna förvärras vid en eventuell brand anser Jan Ottosson²⁰.

Bränder i Li-jon-batterier är mycket svårsläckta och en eventuell insats kan därför förväntas pågå under en längre tid jämfört med en insats för en vanlig fibrös brand av samma storlek. Cellerna är ofta inkapslade och det kan därför vara svårt att komma åt källan till branden och det behövs även mycket kylning för att kunna kyla bort batteriets självuppvärmning. Kvävning är heller inte så effektivt då cellerna avger syre vid termisk rusning (Andersson, et al., 2019). Räddningstjänsten kan således exponeras för vätefluorid och andra skadliga gaser under en längre period. Det är svårt att spekulera kring hur lång tid detta kan vara eftersom det beror på hur mycket det är som brinner och var branden är belägen. FOI:s studie visade att dagens larmställe kunde stå emot 20 minuters exponering av denna gas, men då studerade man inte larmställets mest utsatta delar. Tiden till skadlig exponering kan alltså vara kortare för vissa delar av kroppen då larmställets skarvar och tunnare delar är mer benägna att

¹⁶ Se Bilaga B10 (Anders Lundberg)

¹⁷ Se Bilaga B

¹⁸ Se Bilaga B2 (Torkel Dittmer) och Bilaga B3 (Mattias Arnqvist)

¹⁹ Se Bilaga B8 (Anders Johansson)

²⁰ Se Bilaga B4 (Jan Ottosson)

släppa igenom gasen²¹. Hur mycket kortare är svårt att säga då det saknas forskning kring detta. Det kan dock konstateras att konsekvenserna kan komma att stiga för räddningstjänsten genom osäkra exponeringstider. Exempelvis kan en brandman som vid en insats varit engagerad i släckningsarbetet i 19 minuter, för att sedan avbryta, redan ha erhållit skadliga koncentrationer vätefluorid på vissa delar av sin kropp.

Somliga av respondenterna har tagit upp problematiken med hur en extern brand (med extern syftas här på ett annat utrymme inuti byggnaden) kan komma att utvecklas efter spridning till ett eventuellt energilagret med Li-jon-batterier inträffat²². Det är i dagsläget relativt okänt vad konsekvenserna kan bli, men det står klart att det ger en förhöjd risk för att en del av batterierna i energilagret hamnar i termisk rusning på grund av yttre värmepåverkan. Ett sådant scenario kan leda till att energilagret förvärrar den externa branden genom produktionen av stora mängder rök och giftiga gaser, samt förekomsten av jetflamnor. Räddningspersonal kan på så sätt försättas i en helt annorlunda insatssituation än vad de antagit från början, vilket kan leda till negativa konsekvenser.

När väl en släckinsats är genomförd och de förstörda batterierna skall tas om hand, eller föras ut ur byggnaden, existerar fortfarande en risk för återantändning då den termiska rusningen alltjämt höjer temperaturen inuti skadade battericeller. Detta kan resultera i oönskade konsekvenser för räddningspersonal. Batterierna kan exempelvis antändas när de bärs ut ur byggnaden och orsaka brännskador, alternativt börja brinna under transporten från insatsplatsen, vilket kan leda till exempelvis en trafikolycka. Ett exempel på återantändning är batteribranden på Volvo Cars 2017 (Zommorodi, 2019), där ett felpreparerat Li-jon-batteri fattade eld på grund av kortslutning. Branden släcktes till slut efter en omfattande släckinsats av räddningstjänsten. Tre dagar senare återantände ett av de skadade batterierna under röjningsarbetet, men släckningsarbetet handskades då av Volvos egen personal. Risken för återantändning bör därför tas på allvar av alla som hanterar skadade Li-jon-batterier.

5.3 Riskvärdering

Nedan jämförs de risker som analyserats vidare i riskanalysen med skyddsmålen framtagna i avsnitt 3.3. Detta för att bestämma om riskreducerande åtgärder behövs vidtas för att begränsa konsekvenserna av en eventuell brand i ett energilagret med Li-jon-batterier. Förslag på sådana åtgärder (eller barriärer) kommer dessutom att ges och sammanställas. Skyddsmålen, vilka egenskapskraven i PBF ansågs passande, presenteras här nedan med de icke relevanta punkterna överstrukna. Skyddsmålen består således av nummer 2, 4 och 5.

Egenskapskrav avseende säkerhet i händelse av brand

8§ För att uppfylla det krav på säkerhet i händelse av brand som anges i 8 kap. 4 § första stycket 2 plan- och bygglagen (2010:900) ska ett byggnadsverk vara projekterat och utfört på ett sätt som innebär att:

- ~~1. byggnadsverkets bärformåga vid brand kan antas bestå under en bestämd tid,~~*
- 2. **utveckling och spridning av brand och rök inom byggnadsverket begränsas,***
- ~~3. spridning av brand till närliggande byggnadsverk begränsas,~~*
- 4. **personer som befinner sig i byggnadsverket vid brand kan lämna det eller räddas på annat sätt, och***
- 5. **hänsyn har tagits till räddningsmanskapets säkerhet vid brand.***

²¹ Se Bilaga B9 (Per-Ola Malmquist)

²² Se Bilaga B8 (Anders Johansson) och Bilaga B6 (Kim Wikberg)

Nedan, i Tabell 2, ges dessutom en överblick som visar vilka risker som påverkar vilka skyddsmål och på vilket sätt de gör det. Tabellen visar endast en kort sammanställning, mer detaljer ges i den fortsatta riskvärderingen.

Tabell 2: Överblick av hur olika risker påverkar skyddsmålen.

Identifierade risker → Skyddsmål ↓	Toxiska gaser	Antändning	Räddningstjänstens insats
1. Utveckling och spridning av brand och rök inom byggnadsverket begränsas	Ett skadat batteri kan ventileras ut toxiska gaser som gör energilagret och närliggande utrymmen farliga att vistas i.	Ett energilagret utgör en förhöjd risk för brand, och en eventuell brand kan sprida sig obehindrat från/till detta utrymme.	Brandförloppet kan snabbt förvärras genom spridning till ett energilagret med Li-jon-batterier.
2. Personer som befinner sig i byggnadsverket vid brand kan lämna det eller räddas på annat sätt	En ogenomtänkt placering kan resultera i att ventilerade gaser slår ut en utrymningsväg.	En brand i ett energilagret kan slå ut en utrymningsväg på grund av en ogenomtänkt placering.	Insatsen kan försvåras då människor inte kan lämna byggnaden på grund av en blockerad utrymningsväg.
3. Hänsyn har tagits till räddningsmanskapets säkerhet vid brand	Toxiska gaser kan överraska räddningspersonal då de ej vet att byggnaden innehåller ett energilagret.	Plötslig ökad brandintensitet vid påbörjad insats.	Brist på riktlinjer och information ökar riskerna för räddningstjänsten vid en insats.

5.3.1 Riskvärdering av toxiska gaser

1. Utveckling och spridning av brand och rök inom byggnadsverket begränsas.

Då Li-jon-batterier kan ventileras ut giftiga gaser vid termiska rusning även utan att antändning inträffar, ansågs detta skyddsmål relevant då dessa ämnen fungerar ungefär som brandgaser, och kan således spridas till närbelägna utrymmen. Detta på grund av övertrycket som byggs upp inuti utrymmet. I dagsläget existerar nämligen inga krav på att energilagret innehållandes Li-jon-batterier skall placeras i ett utrymme som begränsar spridningen av toxiska gaser. Produktionen av dessa gaser kan initieras av exempelvis fysisk åverkan på ett av batterierna (se avsnitt 5.1.1), vilket kan leda till att den inre temperaturen i batteriet höjs gradvis till cirka 75 °C. Detta kan i sin tur leda till termisk rusning och initiering av ventileringsfasen. En extern brand kan således göra att dessa batterier börjar ventileras ut giftiga gaser.

I dagsläget anses inte detta skyddsmål uppfyllas med tanke på den förhöjda risken av spridning av toxiska gaser som existerar utan vidare åtgärder. Då ventileringsfasen bland annat kan initieras av förhöjda temperaturer kan ett krav på egen brandcell förhindra att en extern brand höjer temperaturen i energilagret, och på så vis minska risken för ventilering av giftiga gaser. Beräkningar för att verifiera detta presenteras i nästa kapitel. Vidare så anses en brandcell normalt vara mindre genomsläpplig för gaser jämfört med ett vanligt utrymme, även då en brandcellsgräns inte har några täthetskrav. Krav på egen brandcell betraktas därför som ett åtgärdsförslag med stor nytta och som ej medför stora kostnader. I kombination med detta kan täthetskrav på exempelvis dörrar och liknande byggnadsdelar vara ett alternativ för att ytterligare minska spridning av ventilerade gaser. Även förhöjda krav på ventilationen av utrymmet är en åtgärd som hade minskat det övertryck som byggs upp i utrymmet under ventileringsfasen. Detta är också åtgärd som tagits upp frekvent under intervjuerna. Nödventilation som aktiveras av gasdetektorer anses således också som en rimlig åtgärd.

2. Personer som befinner sig i byggnadsverket vid brand kan lämna det eller räddas på annat sätt.

Om ett energilagrar har läckt ut toxiska gaser och är placerat vid exempelvis en utrymningsväg eller entré bedöms dessa utrymmen vara farliga att vistas i. Om det finns toxiska gaser i en utrymningsväg kan den konstateras vara obrukbar trots att gaserna inte upptäcks av människor, som då riskerar att använda utrymningsvägen och omedvetet exponeras för gaserna. På samma sätt kan spridning ske till ett närbeläget utrymme där människor normalt vistas och på så sätt skada dem.

En genomtänkt placering av energilagret är därför av yttersta vikt för att människor säkert ska kunna vistas i byggnaden, samt utrymma säkert eftersom det räcker med att exponeringen endast är kortvarig för att det ska vara skadligt. I riskvärderingen av antändning berörs hur energilagrets placering påverkar utrymning ytterligare.

3. Hänsyn har tagits till räddningsmanskapets säkerhet vid brand.

För närvarande finns inga regler gällande hur ett energilagrar bör märkas och kan således upprättas utan någon som helst indikation på vad som finns inuti utrymmet. Med tanke på de gaser som produceras i ventileringsfasen, vid en termisk rusning eller när Li-jon-batterier brinner, är detta något som räddningstjänsten bör bli förvarnade för vid en insats. Det innebär onödiga risker att utföra en släckinsats i en byggnad utan vetskapen om de giftiga gaserna som kan tänkas finnas där. Även vanliga människor i byggnaden bör ha kännedom om de potentiella risker som ett energilagrar med Li-jon-batterier utgör.

Utan någon som helst märkning anses därför detta skyddsmål ej uppfyllas. Energilagrar bör således märkas med en tydlig text där det framgår vad utrymmet innehåller och att det finns en risk för toxiska utsläpp vid brand och även olämplig användning. Denna kan förslagsvis sitta på dörren. En liknande skylt bör också finnas i huvudentrén av byggnaden eller på brandförvarstablån, lätt synlig för räddningstjänst. Ett annat förslag är även att räddningstjänstens insatsplaner ska innehålla information om vilka byggnader som inrymmer energilagrar med Li-jon-batterier och dess exakta placering.

5.3.2 Riskvärdering av antändning

1. Utveckling och spridning av brand och rök inom byggnadsverket begränsas.

I riskanalysen berörs en mängd olika problemområden relaterat till själva antändningen av Li-jon-batterier i energilagrar, och hur dessa på olika sätt leder till ytterligare konsekvenser. Exempel på dessa var hur ventilerade gaser kunde antändas och skapa jetflammar, som sedan påskyndade spridningen av termisk rusning mellan battericeller, moduler och pack. Problemet med att processen är självförsörjande vad gäller syre, material och värme togs också upp. Branden kan på så sätt snabbt eskalera i ett utrymme som huserar ett energilagrar, och utan skydd mot resterande byggnad kan den sprida sig och förvärra skadan på både byggnadsverket och personer som vistas i byggnaden. Majoriteten av respondenterna²³ anser att ett energilagrar med Li-jon-batterier utgör en förhöjd brandrisk och är inte främmande för en liknelse med ett avskilt pannrum, vilket skall ligga i en egen brandcell. Genom en sådan liknelse anses det rimligt att även energilagrar med Li-jon-batterier skall placeras i en egen brandcell för att reducera tänkbara konsekvenser.

Med tanke på den förhöjda brandrisken en samling av Li-jon-batterier innebär anses detta skyddsmål ej uppfyllas då en eventuell brand kan spridas från och till nämnt utrymme obehindrat. Vidare så kan konsekvenserna av tänkbara risker minskas genom effektiva, prövade och relativt billiga medel. Bara genom att placera energilagret i en egen brandcell förminskar man spridningsrisken av brand avsevärt. En eventuell brand begränsas till utrymmet en längre tid och ger på så sätt räddningspersonal mer tid till att komma fram till platsen för att göra en kontrollerad insats. Brandcellen stänger dock inte inne alla de brandgaser som bildas vilket gör att risken för en fördröjd antändning existerar i närbelägna

²³ Se Bilaga B

utrymmen. Förhöjda krav på ventileringen, exempelvis nödventilation, kan då komma att bli aktuellt för energilagrar. Genom att ventileras ut brandgaserna minskar trycket i rummet vilket reducerar brandgasspridningen, och därigenom minskar risken för en brandgasexplosion. Det förenklar samtidigt räddningstjänstens insats då sikten blir bättre.

Ett par respondenter har resonerat kring hur väl olika aktiva skyddssystem hade fungerat för att angripa en brand i ett energilager med Li-jon-batterier, där sprinkler frekvent togs upp som ett möjligt alternativ. En del respondenter har dock uttryckt sig annorlunda i frågan. Joakim Ilmrud menar på att ett sprinklersystem i ett energilager inte hade löst problemet på grund av den termiska rusningen, men möjligtvis begränsat brandförloppet. Sprinklersystemet hade kylt branden samt närliggande väggar och material, vilket hade kunnat minska konsekvenserna tack vare minskad brandspridning²⁴. Ett krav på sprinklerskydd kan då anses sväromotiverat ur ett kostnads-nyttoperspektiv, men det bedömdes ligga utanför denna rapports ramar att verifiera.

2. Personer som befinner sig i byggnadsverket vid brand kan lämna det eller räddas på annat sätt.

Den gällande lagstiftningen reglerar inte energilagrar placering inom byggnader och de kan således placeras i till exempel källarutrymmen, entréer och intill utrymningsvägar. Detta betyder inte att de kommer att hamna på dessa platser, men risken för en ogenomtänkt placering ökar utan införandet av riktlinjer. Om ett energilager med Li-jon-batterier placeras i direkt anslutning till en foajé eller annan välanvänd utrymningsväg, riskerar denna att slås ut vid en eventuell brand som härstammar från energilagret. En blockerad utrymningsväg kan leda till att utrymningstiden blir längre för somliga individer, vilket kan resultera i skador och i värsta fall dödsfall.

Tillräcklig hänsyn anses inte tas till utrymmande personer i händelse av brand i ett energilager med avseende på avsaknaden av riktlinjer vad gäller placering. Detta är dock något som kan åtgärdas genom framtagandet av riktlinjer vilka uppmärksammar riskbilden av energilager och konsekvenserna av en ogenomtänkt placering. Dessa behöver nödvändigtvis inte vara begränsande, utan fungera mer som ett varnande finger i projekteringsfasen. Om frågan lyfts i ett tidigt skede kan onödiga risker och eventuellt kostsamma omplaceringar i ett senare skede undvikas.

3. Hänsyn har tagits till räddningsmanskapets säkerhet vid brand.

Eftersom bränder är något som räddningstjänsten handskas med nästan dagligen bedömdes detta skyddsmål vara mindre relevant i relation till antändning. Brandförloppet som Li-jon-batterier skapar är dock särpräglad och kan ha stor påverkan på en extern brand. Brandintensiteten kan plötsligt öka vid en eventuell insats. Detta tas dock upp mer detaljerat i riskvärderingen av räddningstjänstens insats.

5.3.3 Riskvärdering av räddningstjänstens insats

1. Utveckling och spridning av brand och rök inom byggnadsverket begränsas.

Vid alla typer av insatser är det viktigt för räddningstjänsten att kunna analysera och bedöma brandförloppet och dess utveckling. Detta för att kunna genomföra en så riskfri insats som möjligt. Vid en potentiell insats i en byggnad som innehåller ett energilager med Li-jon-batterier kan brandförloppet snabbt förändras om branden skulle sprida sig dit. Exakt på vilket sätt är svårt att säga, men det kan konstateras att insatsen skulle försvåras med tanke på den stora rökutvecklingen och de giftiga gaserna som produceras när Li-jon-batterier brinner. Dessutom hade eventuella jetflammar och den höga temperatur som utvecklas vid termisk rusning kunnat påskynda brandspridningen till andra utrymmen.

Med tanke på de tänkbara konsekvenserna för räddningspersonal då en brand sprider sig till ett energilager med Li-jon-batterier under en insats, anses detta skyddsmål ej uppfyllas. Denna risk kan med enkla medel förminskas genom att placera energilagret i en egen brandcell. Genom att försvåra

²⁴ Se Bilaga B1 (Joakim Ilmrud)

brandspridning till ett sådant utrymme kommer räddningstjänsten erhålla mer tid att släcka en potentiell brand i byggnaden innan den förvärras. Beräkningar för att verifiera detta presenteras i nästa kapitel.

2. Personer som befinner sig i byggnadsverket vid brand kan lämna det eller räddas på annat sätt.

Räddningstjänstens insats förändras och försvåras om det finns människor i byggnaden som inte kan ta sig ut på egen hand och som behöver räddas. Om utrymningsvägar är blockerade och människor är instängda kan det innebära att insatsen behöver ske snabbare, vilket kan resultera i att räddningspersonal kan behöva utsätta sig för större risker än vad de annars hade behövt utsätta sig för.

Även här är energilagrets placering central. Välgrundade riktlinjer kring energilagrets placering inom byggnader bedöms minska risken för att ett eventuellt energilager försämrar utrymningsmöjligheterna.

3. Hänsyn har tagits till räddningsmanskapets säkerhet vid brand.

Det har tidigare i rapporten konstaterats att det inte existerar några riktlinjer för hur energilager skall märkas eller skyltas, och hur detta kan komma att påverka boende och räddningstjänst i byggnaden. Fokus har då legat på de toxiska gaserna. Här lyfts istället problematiken kring märkning/skyltning relaterat till brandrisken, samt energilagrets placering, räddningstjänstens larmställ och risken för återantändning.

I och med den förhöjda brandrisken ett energilager med Li-jon-batterier utgör och osäkerheterna kring hur ett externt brandförlopp hade påverkats av ett energilager, bör räddningstjänst rimligtvis förvarnas om dessa risker innan en insats påbörjas. En annan nivå av säkerhet krävs när en det existerar en risk för snabb brandutveckling (MSB, 2015). Avsaknaden av märkning/skyltning i kombination med att utrymmets placering ej är reglerat kan försvåra en potentiell insats då brandmän kan behöva leta sig fram till utrymmet eller förlita sig på människors instruktioner, vilket ger branden tid att växa. Branden kan då tänkas sprida sig till/från energilagret och på så sätt förvärra situationen genom större brandbelastning och förekomsten av giftiga gaser. Dessa gaser är något som räddningstjänsten vanligtvis inte behöver ta hänsyn till vid insatser i vanliga byggnader, vilket kan leda till att de exponeras för en skadlig mängd då deras larmställ inte är tillverkade för att stå emot denna typ av gas en längre tid.

Med ovanstående i beaktning anses inte tillräckligt med hänsyn visas mot räddningsmanskapets säkerhet vid brand. I händelsen av en brand i en byggnad med ett energilager innehållandes Li-jon-batterier bör räddningsmanskapet ha tillgång till information som förvarnar dem om de potentiella riskerna, samt utrymmets placering inom byggnaden. Alternativt att informationen finns att erhålla på plats i form av en skylt i entrén eller utanpå byggnaden. Närmsta och effektivast angreppsväg bör också informeras om här. På detta sätt kan räddningsmanskapet planera sin insats utifrån korrekta förutsättningar, vilket förminskar riskerna för oväntade händelser. Även med dagens osäkerheter kring larmställens skydd kan räddningstjänsten utföra ett effektivt släckarbete, till exempel genom väl genomtänkta insatsplaner och rutiner som förminskar exponeringstiden för brandgaserna. Dock bör mer forskning utföras kring larmställens genomsläpplighet för att fastställa en mer korrekt tid som de kan motstå de toxiska gaser som frigörs vid termisk rusning och då Li-jon-batterier brinner.

I riskanalysen lyftes problematiken kring risken för återantändning efter en släckinsats och hur denna kan påverka bland annat räddningspersonal som hanterar de skadade batterierna. Relaterat till energilagrets utformning finns inte mycket man kan göra för att reducera denna risk, förutom om energilagret placeras så att batterierna lätt kan tas ut ur byggnaden. Det ligger istället hos räddningstjänsten att ta fram rutiner för hur hanteringen av skadade batterier skall gå till. Detta torde inkludera att få ut batterierna ur energilagret och transportera dem till en säkrare plats där de kan övervakas och neutraliseras.

5.3.4 Summering av riskvärdering

Riskvärderingen mynnade ut i ett antal olika åtgärdsförslag som reducerar sannolikhet och konsekvens av de identifierade riskerna relaterat till en potentiell brand i, eller i närheten av, ett energilagret med Li-jon-batterier. Se en sammanställning här nedan:

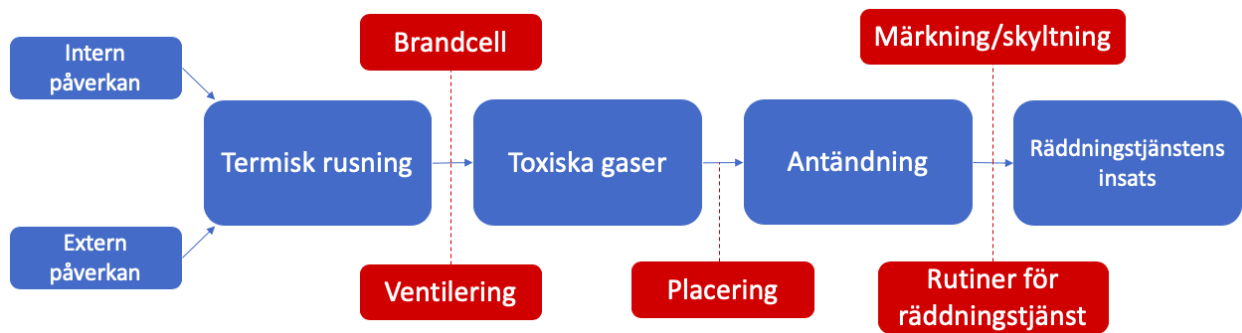
- Energilagret bör placeras i en egen brandcell
- Reglera vart ett energilagret får placeras inom en byggnad, samt dess utformning
- Ställ krav på märkning/skyltning av både energilagret och byggnaden den är placerad i
- Nödventilation
- Rutiner för räddningstjänst (insats och hantering av skadade batterier)

Sammanställningen åskådliggörs dessutom i Tabell 3, där åtgärdsförslagen kopplas samman med relevant skyddsmål och risk.

Tabell 3: Sammanställning av åtgärdsförslagen i relation till skyddsmålen och riskerna.

Identifierade risker → Skyddsmål ↓	Toxiska gaser	Antändning	Räddningstjänstens insats
1. Utveckling och spridning av brand och rök inom byggnadsverket begränsas	<ul style="list-style-type: none"> • Brandcell • Nödventilation • Reglera placering 	<ul style="list-style-type: none"> • Brandcell • Nödventilation 	<ul style="list-style-type: none"> • Brandcell • Reglera utformning
2. Personer som befinner sig i byggnadsverket vid brand kan lämna det eller räddas på annat sätt	<ul style="list-style-type: none"> • Reglera placering 	<ul style="list-style-type: none"> • Reglera placering 	<ul style="list-style-type: none"> • Reglera placering
3. Hänsyn har tagits till räddningsmanskapets säkerhet vid brand	<ul style="list-style-type: none"> • Ställ krav på märkning/skyltning 	<ul style="list-style-type: none"> • Brandcell 	<ul style="list-style-type: none"> • Ställ krav på märkning/skyltning • Rutiner för räddningstjänst • Reglera placering

För att ge en tydligare bild av hur åtgärdsförslagen reducerar riskerna och hur de verkar i relation till den identifierade händelsekedjan, har de sammanställts i samma figur som presenterades i riskidentifieringen, se Figur 7. Observera att en del av åtgärdsförslagen kan ha positiva effekter som omfattar mer än sin placering i denna figur (vilket kan utläsas från Tabell 3), alltså att deras verkan sträcker sig till andra steg än det närmsta. De är dock placerade där de anses ha störst riskreducerande effekt.



Figur 7: Översiktsbild av det identifierade händelseförloppet från riskidentifieringen tillsammans med åtgärdsförslagen.

Två av dessa har en mer teknisk karaktär jämfört med de andra, och kräver således en mer omfattande verifiering. Dessa två är kravet på egen brandcell och nödventilation. Dessutom bedöms de som de åtgärdsförslag som innebär störst kostnad att implementera. Vad som följer i nästa kapitel är således en verifiering samt en dimensionering av dessa två åtgärdsförslag.

6 Kompletterande verifiering och dimensionering

Riskvärderingen mynnade ut i ett antal åtgärdsförslag av olika karaktär och omfattning. Samtliga anses ha en betydande riskreducerande effekt vad gäller energilagring med Li-jon-batterier inom byggnader. Somliga av dem bedöms relativt enkla att implementera medan andra kräver mer omfattande förändringar relaterat till det byggnadstekniska brandskyddet. I detta avsnitt utförs beräkningar för att verifiera och dimensionera de åtgärdsförslag som anses vara av mer teknisk karaktär.

6.1 Verifiering och dimensionering av brandcell

Från teorin i kapitel 2 framgår det att ett Li-jon-batteri kan arbeta under säkra förhållanden om temperaturen hålls under cirka 50 °C. Om temperaturen stiger över denna nivå ökar risken för de processer som kan leda till en termisk rusning, vilka vanligtvis inträffar vid cirka 75 °C. Om en brand uppstår i ett utrymme som angränsar till ett energilagret finns det således en risk att värme överförs in till energilagret via väggen och värmer upp luften i rummet och batterierna till en temperatur som överstiger den rekommenderade. För att motverka detta skall alternativet att placera energilagret i en egen brandcell verifieras. Meningen med att placera energilagret i en egen brandcell är att värmeöverföringen in dit ska ske så pass långsamt genom väggen att människor ska kunna hinna utrymma, samt att räddningstjänsten ska hinna släcka branden innan energilagret eventuellt förvärrar brandscenariot. Brandcellen förminskar givetvis även brandspridning från energilagret och utåt, men detta bedömdes ej nödvändigt att verifiera.

För att kunna verifiera en brandcells verkan gjordes en del antaganden. En vanlig brandcell består vanligtvis av dubbla gipsskivor på respektive sida av reglarna. Värmeöverföringen genom en sådan vägg är relativt komplex att beräkna, varför en solid betongvägg valdes. Detta anses dock som ett konservativt antagande då värme sprids jämnare genom betong jämfört med en vanlig brandcellsvägg, och värmer då upp luften inuti energilagret tidigare. En vanlig brandcellsvägg släpper igenom en mindre mängd värme jämfört med betong då gips har högre specifik värmekapacitet. Gips binder också en hel del vatten som tar upp mycket av den tillförda energin från branden. 80 millimeter betong är ekvivalent mot en typisk EI 60-gräns, och 60 millimeter är ekvivalent mot en EI 30-gräns (Svensk Betong, 2019). När dessa tjocklekar bestämts har man använt sig av en ISO 834-kurva för att modellera en rumsbrand. Detta test tillåter en yttemperatur på cirka 160 °C på den ej exponerade sidan, samtidigt som rumstemperaturen är konstant kring cirka 20 °C. I detta fall antas yttemperaturen inte spela någon roll då en luftspalt antas finnas mellan batterierna och den uppvärmda väggen, där luftens temperatur stiger på grund av väggens värmepåverkan. Fokus ligger här på temperaturen i rummet, vilket inte får överskrida 60 °C. Denna temperatur valdes då den ligger ungefär mellan maxtemperaturen för det optimala arbetsintervallet och temperaturen då batteriet med stor säkerhet kan ta skada. Det som söks är den tjocklek på betongväggen som garanterar att temperaturen inte stiger över 60 °C.

För att kunna avgöra vilken tjocklek som krävs på en vägg som är brandexponerad på ena sidan och placerad mot ett energilagret på andra sidan utfördes beräkningar där värmeöverföringen beräknades genom väggen. Detta ledde fram till en yttemperatur på sidan mot energilagret. Då tiden ökade värmde väggen upp luftens temperatur inne i energilagret, där all luft antogs vara väl omblandad. Detta antagande ledde till att hela rummet höll samma temperatur. Tjockleken på väggen varierades för att fastställa vilken tjocklek som behövdes för att hålla lufttemperaturen under 60 °C efter de satta tiderna. Tjockleken fortsatte varieras fram till att ett tillfredställande resultat uppnåts. Lufttemperaturen tilläts stiga upp till 60 °C under 60 minuter för den första beräkningen samt under 30 minuter för den andra. Adiabatiska förhållanden antas för ej brandpåverkade väggar och bjälklag, se Bilaga C för beräkningar.

Beräkningsresultat:

- Betongtjocklek som krävs för 60 minuters motstånd: 152 millimeter (temperatur: 59,9 °C)
- Betongtjocklek som krävs för 30 minuters motstånd: 100 millimeter (temperatur: 58,8 °C)

Väggarna i de båda fallen hade således behövt ytterligare 72, respektive 40 millimeter betong. Med de antaganden som använts för att genomföra dessa beräkningar hade således en högre EI-gräns behövts för att motverka kritisk värmepåverkan på Li-jon-batterierna i ett energilagret. Som jämförelse presenteras tiderna som vanliga EI-väggar hade stått emot samma brand.

- Tid då lufttemperaturen är cirka 60 °C innanför 80 millimeter betong: 22 minuter
- Tid då lufttemperaturen är cirka 60 °C innanför 60 millimeter betong: 14,5 minuter

Dock är många av de antaganden som gjorts relativt konservativa, till exempel val av material och värdet på brandgasernas emissivitet, se Bilaga C för mer detaljer. Dessutom täcker det beräknade scenariot endast in risken för brandspridning till energilagret och inte ifrån, vilket anses vara det primära problemet då det har konstaterats att energilagret innehållandes Li-jon-batterier utgör en förhöjd brandrisk. Med en brandcell kommer branden fortfarande begränsas till energilagret en ansevärd tid om den startar där. En brandcell som är utformad som resten av byggnaden (vanligtvis EI30 eller EI60) hade således reducerat ett brett spektrum av de identifierade riskerna, värmespridning till energilagret inkluderat (om än begränsad). Om branden startar i ett utrymme som är beläget nära energilagret bedöms människor i byggnaden fortfarande ha minst 22 respektive 14,5 minuter på sig att utrymma innan branden förvärras av energilagret. Risken föreligger då huvudsakligen hos räddningstjänsten som potentiellt måste hantera ett värre brandförlopp än vad som från början var förväntat. Ett högre krav på brandcellgränsen än vad som gäller för resten av byggnaden kan då anses vara i överkant för denna typ av utrymme.

6.2 Verifiering och dimensionering av nödventilation

Li-jon-batterier kan producera stora mängder brandgaser när de väl har antänts, vilket gjorde det intressant att titta närmare på ventileringsdimensioner i ett energilagret innehållandes denna typ av batteri. Eftersom trycket byggs upp snabbt i ett rum där det brinner kan brandgaserna pressas ut genom springor i väggar och bjälklag, och spridas till andra utrymmen som beskrivet i riskanalysen. För att förhindra detta kan krav ställas på nödventilering som klarar av att tryckavlasta rummet vid en potentiell brand. Det är känt att Li-jon-batterier även kan ventileras utan att en antändning inträffat, men ventileringsdimensioner baseras på ett brandscenario eftersom det är då mest gaser produceras, vilket då anses som ett konservativt antagande.

De beräkningar som genomförts är baserade på data tagen från rapporten "*Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests*", där brandtester genomförts på fem pouchceller (Larsson, et al., 2014). Eftersom det existerar en begränsad mängd data relaterat till bränder i energilagret, tilläts denna data få representera ett tänkbart brandscenario. De batterier som använts är kommersiellt tillgängliga pouch-batterier av typen LiFePO₄. I testerna antändes batterierna med avsikten att ta reda på vilka ämnen som produceras, speciellt anseende toxiska ämnen så som vätefluorid. Eftersom fokus låg kring de toxiska gaserna är resten av brandgasernas sammansättning okänd. Vad som avgetts i form av smält plast och liknande låg kvar på vågen och mättes därmed inte. En total massförlust av produkter i gasform från de fem battericellerna togs således för att genomföra flödesberäkningarna. Dock bedömdes fem celler vara i det minsta laget, varpå massförlusten av tio pouch-celler antogs (massförlusten dubblades). Ingen tryckuppbyggnad tilläts inuti energilagret och antändning av de tio cellerna antogs inträffa direkt. Beräkningarna utgjordes framförallt utav två flödesberäkningar, vilka presenteras här nedan.

Ekvation 1 utgör det volymflöde som bildas av batteriernas massförlust under tiden batteriet brinner, med andra ord volymtillskottet i rummet som tillkommer då brandgaser bildas (räknat i antal mol).

$$\dot{V}_{mol} = \frac{\partial n_{RT}}{\partial t} \quad [m^3/s] \quad (\text{Ekvation 1})$$

Där:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \text{mol per tidsenhet [mol/s]}$$

$$R = 8,3145 \text{ [J/mol}\cdot\text{K]}$$

$$T = 293 \text{ [K]}$$

$$P = 101\,000 \text{ [Pa]}$$

Ekvation 2 utgör det volymflöde som bildas av att luften i rummet expanderar av den förhöjda temperaturen, det vill säga volymexpansionen (Jensen, 2006).

$$\dot{V}_b = 0,0081 * \alpha^{0,4231} A^{0,5009} h^{1,0394} \text{ [l/s]} \quad (\text{Ekvation 2})$$

Där:

$$A = \text{Energilagrets golvarea [m}^2\text{]}$$

$$h = \text{Energilagrets takhöjd [m]}$$

Med tillväxtkonstanten α , vilken beror av antalet celler n (Chen, et al., 2018). se *Ekvation 3*.

$$\alpha = n^{1,26} * 1,25 \text{ [W/s}^2\text{]} \quad (\text{Ekvation 3})$$

Värdet $1,25 \text{ W/s}^2$ har beräknats genom att granska effektutveckling under tillväxttiden för två olika rapporter där förbränningstester har utförts på Li-jon-batterier (Ping, et al., 2015; Larsson, et al., 2014). Det visade sig att den maximala effektutvecklingen i de båda rapporterna uppmättes till cirka 50 kW på cirka 200 sekunder, vilket gav följande, med hjälp av beräkningen för en αt^2 -kurva:

$$\alpha = \overline{Q}/t^2 = 50000/200^2 = 1,25 \text{ [W/s}^2\text{]}$$

Tillväxtkonstanten för Li-jon-batterierna visade sig vara relativt liten baserat på denna data, ungefär i samma skala som en brand med tillväxthastigheten *slow*, vilket är 3 W/s^2 ($0,003 \text{ kW/s}^2$).

De båda flödesekvationerna slogs därefter samman för att ta fram ett beräkningsverktyg som kan användas för mer generella fall, Se *Ekvation 4* samt Bilaga D för indata och en mer detaljerad härledning.

$$\dot{V}_{tot} = \frac{\partial n_{RT}}{\partial t P} + 0,0081 * \alpha^{0,4231} A^{0,5009} h^{1,0394} \text{ l/s} \quad (\text{Ekvation 4})$$

I denna ekvation är allting känt förutom rummets dimensioner samt antalet battericeller som antas antändas. Den kan således användas som verktyg för att grovt dimensionera nödventilationens minst rekommenderade flöde i andra utrymmen än vad som antagits i detta fall. Se resultatet som erhållits ur exempelfallet här nedan.

- Nödventilationens rekommenderade effekt: 79 l/s ($0,079 \text{ m}^3/\text{s}$)

Det erhållna flödet är relativt lågt med tanke på att exempelutrymmets volym är 24 m^3 . Detta är dock inte förvånande då Li-jon-batteriernas tillväxthastighet i de båda jämförelserapporterna visade sig vara mycket långsam. Nödventilationen bör dessutom installeras med någon typ av detektion vilket aktiverar den. Detta bör förslagsvis vara en gasdetektor eftersom den dessutom reagerar på de gaser som kan ventileras ut även om antändning inte skett.

7 Slutsats

Efter genomförd intervjustudie kan det konstateras att majoriteten av branschen har relativt likartade tankar kring energilagring innehållandes Li-jon-batterier. Samtliga respondenter lyfte problematiken kring den förhöjda brandrisken ett sådant utrymme utgör vid placering i en byggnad. Dock skilde sig deras tankar åt relaterat till hur det bör hanteras. Ett fåtal antydde att dagens lagstiftning redan tar höjd för detta, men att till exempel krav på egen brandcell hade varit rimligt att implementera. De flesta antydde emellertid att detta är något som behöver justeras i dagens lagstiftning så att det blir mer reglerat och säkert i framtiden. Många respondenter gav här exempel på åtgärder som i mångt och mycket inspirerade och la grunden för riskvärderingen och åtgärdsförslagen som den mynnade ut i. Samtliga åtgärder denna rapport har tagit upp anses ha betydande riskreducerande effekter relaterat till den identifierade händelsekedjan. Somliga av dem är relativt enkla att implementera i förslagsvis projekteringsfasen, där exempelvis en mer genomtänkt placering kan göra stor skillnad för den fullständiga riskbilden. Likaså kan skyltning/märkning höja medvetenheten för människor i byggnaden samtidigt som en eventuell insats kan få bättre förutsättningar. Se sammanställning nedan:

- Energilagret bör placeras i en egen brandcell
- Reglera vart ett energilager får placeras inom en byggnad, samt dess utformning
- Ställ krav på märkning/skyltning av både energilagret och byggnaden den är placerad i
- Nödventilation
- Rutiner för räddningstjänst (insats och hantering av skadade batterier)

Vad gäller de två mer omfattande åtgärdsförslagen existerar fortfarande en del osäkerheter kring framförallt nödventilationen och hur den på bästa sätt skall dimensioneras. Beräkningsmodellen som användes innehöll en del osäkerheter och antaganden vilket kan ha haft stor inverkan på resultatet, vilket bedömdes vara mycket grovt. Mer detaljerade beräkningar hade således behövt genomföras för att verifiera och dimensionera nödventilationens nytta och effekt. Detta hade samtidigt resulterat i ett mer exakt beräkningsverktyg. Beräkningarna för brandcellen innehöll på samma sätt en del grova antaganden, men dess effekt på resultatet kunde jämföras lättare i detta fall. Det visade sig att många av antagandena inte hade så stor inverkan då till exempel olika rumsvolymer och antalet brandpåverkade väggar användes i beräkningarna.

Vad gäller frågeställningarna, vilka presenterades i avsnitt 1.2, anses de ha blivit besvarade genom rapportens gång. En omfattande litteraturstudie och riskidentifiering har genomförts där de generella riskerna med Li-jon-batterier och energilagring har presenterats och analyserats. Den genomförda intervjustudien gav svar på vilka skyddsmålen bör vara när ett energilager projekteras inom en byggnad, samt vilka brandtekniska utmaningar som kan komma att bli de största. Intervjustudien, litteraturstudien och riskbedömningen mynnade slutligen ut i exempel på åtgärder som bör implementeras i praktiken, där en diskussion fördes kring åtgärdsförslagets rimlighet.

I avsnitt 2.2 jämförs energilagring innehållandes Li-jon-batterier med ett avskilt pannrum, vilket är reglerat i BBR. Denna liknelse var inte heller främmande för majoriteten av respondenterna under intervjustudien, utan bedömdes mer som en rimlig jämförelse utav många. Det konstaterades samtidigt att denna föreskrift är det närmsta man kommer till något som reglerar energilagring i dagsläget. Det kan tänkas att i framtida BBR kan ett tillägg göras där energilagring likställs med ett avskilt pannrum och erhåller på så sätt kravet på egen brandcell. Dock bör detta tillägg kompletteras med ytterligare krav på nödventilering och märkning/skyltning, samt reglering av placering inom byggnader.

Referenser

- AGA, 2017. *www.aga.se*. [Online]
Available at: https://www.aga.se/sv/images/V%C3%A4tefluorid%201.0%20SE_tcm586-443678.pdf
[Använd 24 10 2019].
- Akhil, A. A. o.a., 2015. *DOE/EPRI Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA*, Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories.
- Amon, F., Andersson, P., Karlson, I. & Sahlin, E., 2012. *Fire risks associated with batteries*, Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.
- Andersson, P. o.a., 2018. *Lion Fire: Extinguishment and mitigation of fires in Li-ion batteries at sea*, Borås: RISE.
- Andersson, P. o.a., 2019. *Innovativa elsystem i byggnader – konsekvenser för brandsäkerhet*, Borås: RISE.
- Andersson, P. o.a., 2017. *Safe introduction of battery propulsion at sea*, Borås: RISE.
- Batteriföreningen, 2019. *Litiumjonbatterier*. [Online]
Available at: <https://batteriforeningen.se/litium-jon/>
[Använd 15 09 2019].
- Battery University, 2019. *BU-304: Why are Protection Circuits Needed?*. [Online]
Available at: https://batteryuniversity.com/learn/article/safety_circuits_for_modern_batteries
[Använd 14 10 2019].
- Bengtsson, L.-G., 2013. *Inomhusbrand*. 4 red. Karlstad: MSB.
- Bisschop, R., Willstrand, O., Amon, F. & Rosengren, M., 2019. *Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles*, Borås: RISE.
- Blum, A. F. & Long, R. T., 2016. *Fire Hazard Assessment of Lithium Ion Battery Energy Storage Systems*. 1:a red. Bowie, MD, USA: SpringerBriefs in Fire.
- Boverket, 2018. *Boverkets Byggregler, BBR*, Karlskrona: Boverket.
- Chawla, N., Bharti, N. & Singh, S., 2019. Recent Advances in Non-Flammable Electrolytes for Safer Lithium-Ion Batteries. *MDPI*, 5(19), p. 2.
- Chen, M. o.a., 2018. A Simplified Analysis to Predict the Fire Hazard of Primary Lithium Battery. *Applied sciences*, 2329(8), pp. 1-10.
- Ekholm, M. & Fransson, A., 1992. *Praktisk intervjuteknik*. 4th Edition red. Göteborg: Nordstedts Förlag AB.
- Elsäkerhetsverket, 2016. *Informationsbehov och elsäkerhetskrav rörande små- och storskalig energilagring av el*, Kristinehamn: Elsäkerhetsverket.
- Elsäkerhetsverket, 2019. *Planera ditt batterilager*. [Online]
Available at: <https://www.elsakerhetsverket.se/privatpersoner/installera-och-renovera/installation-av-batterilager/planera-ditt-batterilager/>
[Använd 09 2019].
- FM Global, 2017. *FM Global Property Loss Prevention Data Sheets*. [Online]
Available at: <https://www.fmglobal.com/research-and-resources/fm-global-data-sheets>
[Använd 09 2019].

- Jensen, L., 2006. *Skydd mot rökspridning via ventilation med stoppade fläktar och förbigångar - Riskbedömning och dimensionering*, Lund: Lunds Tekniska Högskola.
- Kong, L., Li, C. & Jiuchun Jiang, M. G. P., 2018. Li-Ion Battery Fire Hazards and Safety Strategies. *Energies*, 22 08, pp. 1-5.
- Lackman, T., Nordin, P., Lindblad, U. & Johannesson, Å. A., 2010. *Introduktion till processsäkerhet*, u.o.: IPS.
- Larsson, F., 2017. *Lithium-ion Battery Safety - Assessment by Abuse Testing, Fluoride Gas Emissions and Fire Propagation*, Göteborg: Chalmers University of Technology.
- Larsson, F. o.a., 2014. Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests. *Journal of Power Sources*, Volym 271, pp. 414-420.
- Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P. & Mellander, B.-E., 2017. Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. *Scientific Reports*, 30 08, pp. 1-3.
- Long, R. T. & Blum, A., 2016. *Lithium Ion Batteries Hazard and Use Assessment - Phase III*, Bowie, Maryland USA: NFPA.
- Lönnermark, A., 2018. *Brandsäker energilagring - Sammanställning av risker och forskningsbehov*, Borås: RISE.
- Malmquist, P.-O., 2019. *Utkiken.net*. [Online]
Available at: <https://www.utkiken.net/energilager-och-batteri/44826-intr%C3%A4ffade-br%C3%A4nder-i-batterier-rapporter>
[Använd 28 10 2019].
- Markert, F., 2019. *Nordic FDS User Group Meeting*. Lund: u.n.
- MSB, 2003. *Handbok för riskanalys*. 1:a red. Karlstad: Räddningsverket.
- MSB, 2015. *Skydd mot brand - Före, under och efter räddningsinsats*, u.o.: MSB.
- MSB, 2019. *Lagstiftning om Lituumbatterier*. [Online]
Available at: <https://www.msb.se/sv/amnesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farliga-amnen/farligt-gods/litiumbatterier/lagstiftning-av-litiumbatterier/>
- Ottosson, J., 2018. Hållbart samhälle - nya brandtekniska utmaningar. *Bygg & Teknik*, 09, p. 27.
- Patton, M. Q., 1987. *How to use qualitative methods in evaluation*. 2nd Edition red. Los Angeles: SAGE Publications Inc.
- Ping, P. o.a., 2015. Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with. *Journal of Power Sources*, Volym 285, pp. 80-89.
- Plan- och byggförordning, 2011. *Plan- och byggförordning (2011:338)*. u.o.:Sveriges Riksdag.
- Rausand, M., 2011. *Risk Assessment - Theory, Methods, and Applications*. Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Sandén, B. & Wallgren, P., 2014. *Perspektiv på eldrivna fordon*, Göteborg: Chalmers.
- SIS, 2009. *Svensk Standard, SS-ISO 31000:2009*. u.o.:SIS Förlag AB.
- Sturk, D., Hoffmann, L. & Tidblad, A. A., 2015. Fire Tests on E-vehicle Battery Cells and Packs. *Traffic Injury Prevention*, Volym 16, pp. 159-164.

Svensk Betong, 2019. *Tabeller för betongelementkonstruktioner*. [Online]
Available at: <https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/bygga-med-prefab/brand/tabeller-for-betongelementkonstruktioner>
[Använd 25 11 2019].

Utkiken.net, 2017. *www.utkiken.net*. [Online]
Available at: <https://www.utkiken.net/energilagring-och-batteri/46842-v%C3%A4tefluorid-och-fluorv%C3%A4tesyra>
[Använd 28 10 2019].

Vetter, M. & Rohr, L., 2014. Lithium-Ion Batteries for Storage of Renewable Energies and Electric Grid Backup. i: *Lithium-Ion Batteries Advances and Applications*. 1:a red. Freiburg: Elsevier, pp. 293-308.

Zommodi, L., 2019. *Batteribranden på Volvo Cars*. [Online]
Available at: <https://www.brandskyddsforeningen.se/om-oss/pressrum/artiklar-fran-brandsakert/batteribranden-pa-volvo-cars/>
[Använd 21 11 2019].

Bilaga A

Intervjuguide

Inledning

- Presentera oss själva och arbetet (avdelning, mål och syfte, tidsram osv),
- Gå igenom förutsättningarna för intervjun; anonymitet, inspelning, hur materialet kommer att användas i arbetet, tydliggör att tänkande utanför dagens ramar och lagstiftningar är uppskattat,
- Starta inspelning,
- Skulle du kunna berätta kort om din yrkesroll?

Li-jon-batterier

- Användandet av litiumjon-batterier har ökat mycket i många olika branscher de senaste åren, vad känner du till om dessa batterier?
 - Har du kommit i kontakt med dessa i din yrkesroll? I så fall på vilket sätt?
- Baserat på din erfarenhet och kunskap om li-jon-batterier, vilka risker och/eller utmaningar ser du med dessa batterier och dess ökade användning?
- Känner du till begreppet termisk rusning och kan du i så fall kort beskriva vad det innebär?
 - Kan det innebära några särskilda risker som behöver beaktas?

Energilagring

- Energilagring, kommer du i kontakt med denna term i din yrkesroll?
 - I vilka situationer då?
 - Kan du förklara mer exakt vad ett energilager är?
 - Vilken typ av energilager har du kommit i kontakt med?
- Skulle du säga att dagens byggregler är tillräckliga för att hantera införandet av energilager i dagens byggnader?
 - Varför? Varför inte?

Riskbild

- Avseende brandskydd och utrymning; vilka risker och utmaningar ser du med att placera ett energilager med li-jon-batterier inom en byggnad?
 - Hur bedömer du att riskerna och utmaningarna bör hanteras eller begränsas?
- Enligt dig, vad hade varit passande att ha som skyddsmål vid projekteringen av ett energilager? (Om exempel krävs; till exempel förhindra att brand propagerar mellan battericeller, brandgaser får ej ansamlas i utrymmet, personer i byggnader skall ej utsättas för giftiga gaser).
- Anser du att ett energilager med li-jon-batterier innebär en större risk i en byggnad jämfört med till exempel ett avskilt pannrum? Vilket har specifika krav enligt BBR (5:249 och 5:427).
 - Varför? Varför inte?

Brandtekniska åtgärder

- Ser du några problem med att energilager inte är specifikt reglerade i BBR?
 - Varför? Varför inte?
- Hur skulle du vilja benämna eller klassa ett utrymme som innehåller ett energilager med li-jon-batterier? Antingen med dagens lagstiftning, eller om något nytt tillägg hade varit mer passande.
- Om du fick bestämma, vad skulle i så fall vara de brandtekniska minimikraven på ett energilager med li-jon-batterier?
 - Varför just dessa?
- Bedömer du att kraven du tagit upp är skäliga ur ett kostnads-nyttoperspektiv?

- Är det något annat du tänker på och vill nämna? Har du andra funderingar kring risker rörande ljon-batterier och energilager?

Bilaga B

Sammanfattningar av intervjuer

Bilaga B innehåller sammanfattningar från samtliga intervjuer. Sammanfattningarna är uppdelade i samma tekniska områden som intervjuguiden. En sammanställning visas i Tabell 4.

Tabell 4: Sammanställning av Sammanfattande bilagor.

B1	Joakim Ilmrud
B2	Torkel Dittmer
B3	Mattias Arnqvist
B4	Jan Ottosson
B5	Jonas Olsson
B6	Kim Wikberg
B7	Andreas Johansson
B8	Anders Johansson
B9	Per-Ola Malmquist
B10	Anders Lundberg

Bilaga B1

Datum: 04/10/19

Namn: Joakim Ilmrud

Företag: Räddningstjänsten Syd

Yrkesroll: Arbetar som brandingenjör och yttre befäl vid olyckor samt med operativ utveckling

Li-jon-batterier

Att användandet av li-jon-batterier ökar är Joakim inte förvånad över med tanke på deras höga energikapacitet och för att det finns goda möjligheter till att anpassa dem utifrån vilket område man vill använda dem i, med avseende på energidensitet och energilagringmöjlighet. Användandet av Li-jon-batterier kommer att spridas till i princip alla områden och ett område som han ser en viss oro inför är användandet av batterierna i hemmet/fasta platser. Där blir det allt mer populärt att lagra energi från solceller och det är ett område som Räddningstjänst Syd inte riktigt har koll på.

Termisk rusning är väldigt svår att påverka. Det är svårt att hantera en brand som uppstår från termisk rusning. Finns inget släckmedel som ger ett bra släckresultat för bränder i li-jon-batterier. Fokus hamnar på att kyla och begränsa spridning, uttrycker sig Joakim.

Riskbild

Joakim menar att det inte finns några risker med brandskydd och utrymning så länge det är tekniskt avskilt. Om den inte är det så finns spridningsrisk av brandgaser. Placering av energilager ska inte vara där potentiella brandgaser kan komma ut i miljöer som förväntas vara publika lokaler och utrymningsvägar. Skyddsmål vid projektering av energilager bör vara människors liv och hälsa, anser Joakim. Egendomsskyddet ska poängteras, men inte ur ett projekteringsmål utan ur ett egenintresse. Det går inte riktigt att likställa ett pannrum med ett energilager för om det skulle bli en ventilationskontrollerad brand så skulle branden troligtvis fortsätta i ett energilager oavsett, på grund av den termiska rusningens förmåga att producera syre själv i processen. Men om utrymnet är rätt utformat så bör inga gaser komma ut och då är det ju likvärdigt, enligt Joakim.

Joakim säger att problematiken med allt detta är den termiska rusningen, med tanke på de giftiga och brännbara gaser som produceras samt den kemiska processen som är svår att påverka från vår sida. Det innebär att vi har ett problem som kan generera fler problem, säger Joakim. Men med det sagt är detta kanske något man kan säkerställa så att det inte sker framöver. Nya tekniska system och skyddsbarriärer byggs in i batterierna vilket sänker risken för termiska rusningar. Då är helt plötsligt detta en icke-fråga.

Brandtekniska åtgärder

Han fortsätter med att han då tror att det blir väldigt svårt att införa lagstiftningar kring det här ämnet då det är ett tekniskt område som kan förändras lika snabbt som det kom. Han tror att det är tekniskt omöjligt att reglera eftersom det är en ständig utveckling i batteribranschen. Joakim är lite osäker kring hur ett släcksystem hade hjälpt i ett energilager. Till exempel kommer sprinkler inte att lösa problemet om en termisk rusning fortgår, det kommer möjligtvis att begränsa brandförloppet.

Att hitta skyddsbarriärer för detta är svårt med tanke på att termisk rusning inte går att påverka, utan det enda sättet att hantera det kan nog vara att hitta ett sätt att avbryta/begränsa processen rent tekniskt inne i batteriet. Om han hade fått frågan idag hade han kunnat ge generella råd till projekteringen av ett energilager: egen brandcell, långt ifrån byggnad, minska spridningsrisken, minska rökpåverkan.

Joakim är nyfiken på hur mycket biprodukten vätefluorid påverkar oskyddade personer men även brandmän i larmställ. Där finns det kunskapsluckor och det ligger i deras intresse att få mer information kring detta.

Bilaga B2

Datum: 04/10/19

Namn: Torkel Dittmer

Företag: Brandskyddslaget

Yrkesroll: Brandskyddskonsult

Li-jon-batterier

Torkel har varit i kontakt med li-jon-batterier en hel del, men då framförallt relaterat till elbilar och laddningsstationer där han utfört en del arbeten med riskerna associerade med dessa. Mycket av den oro som cirkulerar inom detta område har att göra med vätefluorider som släpps ut i luften vid bränder som involverar li-jon-batterier, berättar Torkel. Speciellt riskerna för räddningstjänsten vid en eventuell insats. Torkel har gjort en del utredningar för att ta hänsyn till dessa risker.

Energilagring

Energilagring är inte något som Torkel stöter på särskilt ofta i sin yrkesroll, men han känner till problematiken och frågeställningarna kring området. Han har dock arbetat en del med UPS-rum i större byggnader innehållandes både bly-syra-batterier och li-jon-batterier.

Torkel anser att dagens byggregler är goda nog för att hantera energilager med li-jon-batterier i dagens byggnader. Vidare så tycker han att det inte är i byggreglerna dessa utrymmen bör regleras då det är mycket svårt för byggreglerna att följa med i utvecklingen kring dessa batterier. Forskningen går framåt med så kallade "Solid State"-batterier, vilka kommer göra att termisk rusning inte är ett problem längre, då man byggt bort den risken rent kemiskt. Det känns då irrelevant att göra om byggreglerna efter ett problem som kanske kommer att försvinna inom en snar framtid, anser Torkel.

Väldigt svårt för Boverket att följa med i utvecklingen när det kommer till detta problem, säger Torkel. Han tycker det då är rimligare att Elsäkerhetsverket hanterar detta, till exempel med olika skyddssystem i själva batterisystemet och laddningssystemet.

Riskbild

Den primära risken med energilager uppkommer vid en eventuell räddningsinsats, eller att civila personer i byggnaden får för sig att göra en insats, uppger Torkel. De kan då utsättas för de giftiga gaser som utsöndras från batteriet vid termisk rusning. Framförallt civila kan ha svårt att förstå att gaser kan vara giftiga även om de inte andas in, vilket är fallet för vätefluorider. Han understryker också risken med insats då insatsvägen är klurig, alltså då utrymmet till exempel är beläget i källarplan, vilket det ofta är. Det bör skyltas för räddningstjänsten att byggnaden är utrustad med ett energilager så de är förvarnade vid en eventuell insats, menar Torkel.

Just nu är den mest använda släckmetoden vatten, dels för att ta upp de giftiga ämnena ur röken, dels för att minska brandens åverkan. Därför bör utrymmet ej vara känsligt för vatten, menar Torkel, eftersom stora mängder vatten kan i så fall skada byggnaden på andra sätt. Detta är dock svårt att reglera i lagstiftning då det är relativt icke-konkret och kan skilja sig mycket från fall till fall. Torkel tror mer på branschrekommendationer av något slag.

Vad gäller jämförelsen mellan ett energilager och ett avskilt pannrum anser Torkel att ett avskilt pannrum utgör en större risk då man faktiskt eldar i dessa utrymmen, och säger också att termisk rusning är väldigt ovanligt för större system då det finns välutvecklade övervakningssystem idag. Nya batterier med hög kvalitet löper mycket låg risk för termisk rusning. Det är framförallt enstaka batterier i produkter med sämre kvalitet, till exempel billiga hoverboards och liknande, som utgör denna risk.

Stads-skotrarna som för inte så länge sen kom till Sverige är ett exempel där det har varit väldigt få incidenter med dessa batterier då de är av hög kvalité, menar Torkel. Risken är i princip noll för ett modernt friskt batteri som får arbeta under rätt omständigheter. Alltså ingen risk som man bör projektera efter, som samhället skall lägga pengar på och motverka, uppger Torkel. Han poängterar dock att tillverkarens anvisningar är otroligt viktiga att följa när ett energilager installeras.

Torkel skulle inte vilja se så mycket reglerat bygglagmässigt. Hellre då rekommendationer från tillverkare i samråd med elsäkerhetsmyndigheter.

Torkel tar upp frågeställningen med att en brand sprider sig till ett energilager och vad det då kan leda till. I vissa fall har det lett till termisk rusning, i vissa fall inte. Det finns väldigt lite data kring vad man kan förvänta sig vid en eventuell brand i ett energilager inom en byggnad.

Brandtekniska åtgärder

Torkel ser inga direkta problem med att energilager inte är specifikt reglerade i BBR. Det borde i så fall ligga i Elsäkerhetsföreskrifterna.

Angående om ett energilager bör ligga i egen brandcell menar Torkel att om man har något runt omkring som är en brandrisk och man vill skydda energilagret kan kanske egen brandcell vara aktuellt, men inte för att skydda det runtomkring för energilagret. Vidare så tar han upp problematiken med att om det ligger i en egen brandcell kommer temperaturen där inne att höjas enormt då alla de tre komponenterna för brand finns där vid termisk rusning. Detta skulle kunna bli mycket besvärligt och ha oanade konsekvenser relaterat till släckningsarbete. Torkel tror inte det är rätt väg att gå vad gäller skydd av energilager.

De här rummen om några bör utrustas med sprinklers, för dessa kyler branden och tvättar ur gifter ur röken. Det är därför väldigt gynnsamt att installera sprinklers i dessa utrymmen, men Torkel skulle inte säga att det borde bli ett krav. Om det blev ett krav skulle en villa med ett energilager (eller en elbil i garaget) vara tvunget att installera sprinklers.

Vid projektering av ett energilager bör man minst beakta ytskikten och möjliga antändningskällor för att undvika att det finns något brandfarligt i samma rum. Mycket fokus bör ligga på klimatet i rummet, för att se till det inte är för fuktigt, för varmt eller för kallt osv. Ventilationen och placeringen inom byggnaden är således viktig vid projekteringen. Man skall hålla kraven som batterierna är gjorda för helt enkelt, menar Torkel. Stora variationer i detta dock, så det gäller att anpassa det för rätt typ av batteri.

Torkel avslutar intervjun genom att lyfta problematiken med elbilar och tillhörande laddningsplatser i parkeringsgarage. Svårt att förbjuda elbilar från att ställa sig på vissa platser, eller kräva laddning på vissa platser med förhöjd säkerhet. Något som kan liknas vid energilagring då batterikapaciteten är ungefär lika stor som den som man kunde ha hittat i ett energilager tillhörande en villa. Räddningstjänsten måste alltså kunna hantera en sådan brand vart den en sker eftersom det finns en risk (om en mycket liten) att bilarna börjar brinna någon annanstans också.

Bilaga B3

Datum: 07/10/19

Namn: Mattias Arnqvist

Företag: FSD

Yrkesroll: Brandingenjör (Tekniskt ansvarig på FSD i Göteborg)

Li-jon-batterier

Mattias besitter en del kunskap om Li-jon-batterier, dels från inläsning inför projekt och presentationer som de på FSD har anordnat och dels från regelbunden bevakning av olika kanaler. Mattias säger att riskerna och utmaningarna med li-jon-batterier i huvudsak är att det inte finns något regelverk som reglerar dessa än, samt att alla risker med dem inte är kända. Den största faran enligt Mattias är att det inte finns något krav på extern syretillförsel för förbränningen, den termiska rusningen ger en effektutveckling oavsett eftersom den kemiska processen producerar eget syre. Energilagringssystem sätts vanligtvis in i små utrymmen, så om en brand uppstår i system där termisk rusning inte kan ske kan den ofta slockna på grund av för lite syre. Bränder i li-jon-batterier kan som sagt fortgå ändå. Det i kombination med att gaserna som släpps ut av dessa bränder är väldigt toxiska gör att det kan uppstå fara när man placerar dem i byggnader. Vid en brand sprids gaserna antingen via ventilationen eller under dörren när termisk expansion sker i utrymmet.

Energilagring

På FSD har de stött på energilagring i form av UPS-system eller energilagring i form av biomassa eller pellets.

Mattias menar att regelverket idag inte säger att man inte kan göra en säker anläggning men det innebär heller ingen garanti för att anläggningen blir säker. Man vet inte hur anläggningen kommer att utformas överhuvudtaget utifrån hur regelverket ser ut i dagsläget.

Riskbild

Avseende brandskydd och utrymning säger Mattias att den största risken och utmaningen med att placera ett energilager med li-jon-batterier i en byggnad är om man placerar det intill ett annat utrymme dit brandgaser kan spridas genom exempelvis dörrspringor. Det är i princip garanterat om man inte utför åtgärder utöver vad som är normalt idag. Om det då är en korridor utanför rummet som används för utrymning har man blockerat den.

Det finns även risker rörande insatser från räddningstjänsten eftersom man inte vet hur farliga brandgaserna är men man vet att de är farliga. Man vet också att utrustningen man har inte skyddar fullständigt.

Vid projekteringen av ett energilager anser Mattias att ett lämpligt skyddsmål är att man ska säkerställa att en brand inte orsakar spridning av brand och brandgaser till andra utrymmen. Om man ska vara mer specifik relaterat till skyddsmål anser Mattias att man kan sätta en övre gräns på vilken tryckuppbyggnad som får ske i utrymmet, samt att det ska finnas brandgasventilation eller möjlighet för räddningstjänst att göra en insats utan att komma i kontakt med brandgaserna.

Mattias menar att det är svårt att jämföra energilager med li-jon-batterier med ett avskilt pannrum eftersom i en panna har man en kontrollerad förbränning, normalt sett, som pågår kontinuerligt. Det är en välkänd teknik. Enligt Mattias är brandförloppet i ett energilagringssystem med li-jon-batterier mer oförutsägbart och det sker en okontrollerad process. Han gör bedömningen att riskerna med energilager med li-jon-batterier är likvärdiga eller större än ett pannrum, där han väger in att det finns ett kunskapsglapp i den här typen av anläggningar jämfört med andra typer av anläggningar.

Brandtekniska åtgärder

Enligt Mattias är det största problemet med att energilager inte är reglerade i BBR att det inte kommer att bli någon enhetlig tillämpning när man projekterar dem, utan de kommer att se olika ut. Tittar man på dagens lagstiftning så skulle ett utrymme innehållandes ett energilager med li-jon-batterier motsvara det som klassas som Vk6, enligt Mattias. Det är inte orimligt att i detta fall ställa de krav som ställs på Vk6 då energilager fyller många av de kriterierna, det finns exempelvis en risk för att en brand som uppstår utvecklas väldigt snabbt.

Om Mattias skulle sätta brandtekniska minimikrav på dessa utrymmen tänker han främst att de skulle placeras i en egen brandcell med minst EI60, någon typ av system för tryckavlastning och möjlighet till brandgasventilation. Om utrymmet är anslutet till andra utrymmen som används för utrymning så ska det finnas en brandsluss.

Mattias tycker att det lättaste sättet att hantera dessa risker är att sätta energilagret i en extern byggnad. Eller att man har det i ett utrymme som inte är kopplat med en dörr som leder in i övriga delar av byggnaden.

Bilaga B4

Datum: 07/10/19

Namn: Jan Ottosson

Företag: WSP

Yrkesroll: Brandkonsult

Li-jon-batterier

Jan berättar kort om hur li-jon-batterier utvecklar farliga gaser, både brandfarliga och giftiga, vid antändning. Relaterat till energilager byggs då denna risk in i byggnader, något vi inte behövt hantera sedan innan. Detta kan bilda en hotande miljö för exempelvis räddningstjänsten som de inte har ställts inför innan vid en eventuell släckinstans. Dessa energilager kan komma att ställa högre krav på skyddsutrustning, släckutrustning och insatsplaner, menar Jan.

Energilagring

Jan menar att man helst inte vill lagra energi i batterier i dagsläget, utan att trenden går mot att koppla en större mängd solcellspaneler till mer än bara en byggnad. Detta kan till exempel vara en förskola/skola tillsammans med en gymnastikhall tillsammans med ett äldreboende eller ett par villor. På detta vis kan energin från solcellerna användas dygnet runt och till 100 % spritt över de olika verksamheterna eftersom de behöver energi vid olika tider på dygnet, vilket då gör energilagring överflödigt. Många sådana projekt är redan igång, där man försöker undvika energilagring i batterier, uttrycker Jan.

Dagens byggregler är ej tillräckliga för att hantera införandet av energilager inom byggnader, anser Jan.

Riskbild

Eftersom det inte finns några krav på var ett energilager får placeras i en byggnad (förutom i en utrymningsväg där inget brännbart material får placeras) kan en eventuell osmidig placering komma att påverka både byggnadens brandskydd och utrymningsmöjligheter vid en brand, menar Jan.

Skyddsmålet som man bör ha vid projektering av energilager är människors säkerhet i byggnaden och att de inte skall utsättas för de farliga gaser dessa batterier utsöndrar vid en brand, antyder Jan. Vidare så skall inte heller människor löpa risk för att bli inestängda på grund av rök eller brand från ett energilager.

Risken som li-jon-batterier utgör i ett energilager beror mycket på mängden av batterier. En liknelse kan här dras till pannrum som styrs av effekten de kan komma upp i, uppger Jan. Gränsen för pannrum går vid 60 kW, över denna gräns måste den placeras i en egen brandcell. En normalstor panna i ett vanligt hus behöver därför oftast inte placeras i egen brandcell. Detta gränsmått på 60 kW skulle kunna bistå i att ta fram något liknande för energilager, vilket då skulle kunna liknas vid en viss mängd batterier, uttrycker sig Jan. En tydlig gräns på batterimängd känns mycket rimligt, enligt Jan.

Brandtekniska åtgärder

Ett stort problem nu är att ingen vet om man skall placera 1 eller kanske 10 batterier i egen brandcell, eller om de ens skall ha en egen brandcell. På något vis måste detta ses över och regleras, säger Jan.

Vad gäller klassning på ett energilager hade Jan inte velat klassa det som verksamhetsklass 6, utan hellre under samma kategori som pannrum, alltså som ett driftrum för byggnaden. Verksamhetsklass 6 känns lite för rejält för denna sorts utrymme, anser Jan.

Kraven för utrymmet energilagret placeras i skall hålla de kraven som ställs för byggnaden i övrigt, är det exempelvis en Br 1 byggnad så skall utrymmet hålla EI 60 och placeras i egen brandcell, anser Jan.

Avslutningsvis uttrycker sig Jan om en framtid där han tror energilagring inte kommer användas i så stor utsträckning just på grund av att man kommer att använda den utvunna energin direkt i olika verksamheter vid olika tidpunkter på dagen.

Bilaga B5

Datum: 08/10/19

Namn: Jonas Olsson

Företag: Räddningstjänsten Storgöteborg

Yrkesroll: Brandingenjör och Insatsledare

Li-jon-batterier

Största utmaningen för tillfället gällande dessa batterier är produktionen av vätefluorid vid antändning och hur väl räddningstjänstens larmställ skyddar mot denna mycket farliga gas. Detta är något som stora delar av räddningstjänsterna i Sverige är engagerade i, säger Jonas. De samarbetar både med MSB och RISE, samt tillverkarna av larmställen i denna fråga. Forskning pågår för att fastställa vid vilken koncentration dessa gaser blir skadliga för räddningstjänstpersonal.

Mycket problematik existerar också kring den kraftiga rökutveckling dessa batterier har, samt risken för återantändning. Jonas berättar om en insats i en byggnad där ett elcykelbatteri hade börjat brinna i hallen i en lägenhet. När brandmännen trott de släckt elden i batteriet och gått vidare in i lägenheten, återantände batteriet och orsakade ett slangbrott.

Energilagring

Jonas berättar att energilager är något som börjar komma mer och mer nu, speciellt för större företag och flerbostadshus, där de vanligtvis är kopplade till solceller. Vidare så tar Jonas upp det faktum att det inte står något som reglerar energilager i BBR, vilket är något som borde rättas till. Räddningstjänsten har tagit fram egna riktlinjer som summerar sådant som man bör tänka på relaterat till bränder i li-jon-batterier.

Räddningstjänsten mottar en hel del frågor från brandkonsulter som undrar om energilager bör klassificeras som verksamhetsklass 6 eller inte, men denna fråga är svår för dem att svara på. Det existerar dock antydningar i att så kan bli fallet i framtiden, antyder Jonas. En av faktorerna som kommer att spela in då är hur stor mängd batterier det gäller.

Riskbild

Jonas poängterar att placeringen av energilagret är av stor vikt för hur det kan komma att påverka byggnadens brandskydd och utrymningsmöjligheter vid en eventuell brand. Ett bra exempel är då det är placerat i ett eget utrymme med mekanisk ventilation. Något som skall undvikas är att placera energilager i samma brandcell som huserar sovande personer. Här kan risken dock skilja sig mycket beroendes på batteri. Om det är nytt och modernt med ett välfungerande BMS gentemot om det är gammalt och slitet i sämre kvalitet. Då detta är relativt ny teknik har dessa problem inte börjat uppstå riktigt än, men Jonas uttrycker oro om vad som kan ske om 10 år.

Skyddsmål bör vara människor säkerhet, och därför bör ett energilager ej placeras i samma brandcell som sovande personer, anser Jonas.

Vid jämförelse av risk mellan ett energilager och ett avskilt pannrum anser Jonas att ett energilager kan utgöra den större risken av de två. Detta på grund av de mycket giftiga gaser som kan produceras av batterierna, vilka kan leda till större konsekvenser.

Brandtekniska åtgärder

Vad som skulle behövas är någon form av standard på säkerhetssystem för själva energilagringssystemet med övervakande roll som kunde förvarna om det inträffade fel i batterierna. Jonas understryker också att man inte bör få placera ett energilager vart som helst inom en byggnad.

Jonas antyder att li-jon-batterier kan behöva behandlas på liknande sätt som brandfarlig vara, och ser inte främmande på att ett större energilager kan komma att klassificeras som verksamhetsklass 6 i framtiden. Detta beror dock väldigt mycket på mängden av batterier, understryker han. Vidare så uttrycker sig Jonas om att det kan komma att behövas en ny klassning för denna typ av utrymme då verksamhetsklass 6 inte är helt perfekt. Jonas kan också tänka sig att detta regleras av någon annan lagstiftning än BBR.

Minimikraven som Jonas vill se för ett energilager hade varit som för brandfarliga varor, nämligen egen brandcell och egen ventilation. Eventuellt över en viss effekt att det kan tillkomma krav på automatiskt släcksystem. Vilket typ av system som borde användas till detta kan diskuteras, säger Jonas. Om kostnaderna för dessa system är skäligen svårt att veta, säger Jonas. Än så länge finns det inte så mycket statistik för bränder i energilager.

Avslutningsvis poängterar Jonas att det är kvaliteten på energilagringssystemet som till stor del avgör hur stor risken är. Satsar man tidigt på att införa åtgärder så som egen brandcell och egen ventilation så har man kommit en bra bit på vägen (vad gäller det passiva skyddet), menar Jonas.

Bilaga B6

Datum: 08/10/19

Namn: Kim Wikberg

Företag: Volvo Cars

Yrkesroll: Operational risk manager

Li-jon-batterier

Kim menar att det nog är lätt att blanda olika typer av batterier på hanteringsnivå för att på så sätt sätta samma skyddsnivå på dem. Olika typer av batterier är förknippade med olika risker och vissa batterier anses medföra större risker än andra. Om någon då "buntar ihop" batterier även riskmässigt kan det medföra problem eftersom de batterier som anses farligast riskerar att hanteras i en lägre skyddsnivå än vad som är lämpligt.

Energilagring

Kim kommer i kontakt med energilagring på olika sätt inom sitt yrke. Batterier är en huvuddel inom Volvos bilar på olika sätt nu och framöver och i energilagringssystem återanvänder de även redan använda batterier.

Kim anser inte att dagens byggregler är tillräckliga för införandet av energilagring i byggnader. Mycket forskning och utveckling kvarstår innan man kan sätta specifika regler. Det finns så pass många varianter av energilagring, så man får se till att göra en fördjupad studie och hitta lösningar för varje enskilda fall.

Riskbild

Gällande utrymning menar Kim att det nog inte behöver vara några särskilda regler för just byggnader med energilagring innehållandes li-jon-batterier. Oavsett om det är ett batteri eller exempelvis en brandfarlig vätska så ska alla hinna ut ändå. Det behöver inte finnas några annorlunda regler för det, dock eventuellt att man ska kräva kortare gångavstånd då energilagring med batterier används. Avseende brandskydd kan det bli aktuellt med lite nya angreppssätt gentemot vad som finns idag. Det kan komma att krävas möjlighet att flytta batterier ut i det fria, möjlighet att dränka dem samt stänga in batterier som brinner. De skiljer sig nämligen mot både brandfarlig vätska samt andra fasta material.

Brandtekniska åtgärder

Kim ser ett problem med att det inte finns regelverk som behandlar frågan kring energilagring, vilket kan göra att det blir fler egna lösningar och spridda skurar på skyddssystem. Om han idag skulle klassa ett energilagringssystem med li-jon-batterier så skulle det gå in under V6.

Enligt Kim bör ett energilagringssystem med li-jon-batterier placeras i egen brandcell och eventuellt att det ska förflyttas ut till en annan byggnad. Om det börjar brinna kan man nog i princip låta det brinna ut men man kan kyla och begränsa spridning av det genom sprinkler och andra släcksystem. Man får även begränsa mängden batterier per brandcell. Vid stora mängder batterier kan brandgasventilation vara en passande skyddsåtgärd.

Ett batteripack som används på Volvo brinner i ungefär 60 minuter och Kim säger att strategin då är att låta det brinna ut på ett så säkert sätt som möjligt genom instängning eller placering ute i det fria. Den lösningen kan enligt Kim vara lite okonventionell och svår att lagstifta kring, men det är en viktig skyddsmöjlighet.

Kim berättar att generellt inom industrin är det få BBR-krav som beaktas utan det är ofta egna högre ambitionskrav som styr, där egendomsskydd också är i fokus. Mängden batterier är väsentlig när det kommer till skyddsnivån, fler batterier ger högre risk för brand samt större brand vilket blir svårare att släcka.

På Volvo håller de ständig koll på forskning och utveckling och gör även egna tester med egna släcksystem som går rakt in i batteripaketet.

Bilaga B7

Datum: 9/10/14

Namn: Andreas Johansson

Företag: Volvo Group Real Estate

Yrkesroll: SME (Subject Matter Expert) inom brandskydd och fysisk säkerhet

Li-jon-batterier

Dessa batterier är något Andreas jobbar dagligen med då de förekommer i produktionen och i användandet av deras elektriska fordon, men också mycket inom deras forskning och utveckling. Han understryker här att mycket fokus läggs på vilken kemi det är som bör användas i batterierna, med både säkerhets- och effektivitetsaspekter i åtanke. Andreas bistår med säkerhetslösningar till Volvos enheter som utvecklar och tillverkar elfordon utifrån ett fastighetsperspektiv. Han driver säkerhetsarbetet med skydd som berör fasta installationer av exempelvis ESS-lösningar.

Andreas menar att trots med de säkerhetssystem som existerar i dagsläget så händer det fortfarande olyckor, och då gäller det att ta reda på vart och hur de inträffar så de kan motverkas. Det är den termiska rusningen som ligger till grund för risken med dessa batterier, uttrycker Andreas. De kan ta skada vid användning eller transport (av exempelvis överladdning och fysisk åverkan), som sedan leder till termisk rusning. Volvo är väldigt måna om att förhindra detta från att hända.

Energilagring

Energilagring är ett välanvänt begrepp inom Volvo och kan användas för både rum med batterier men också för elfordon, vilka är utrustade med relativt kraftiga batterier. De har länge haft många applikationer som körts med bly-syra-batterier men li-jon-batterierna kommer mer och mer, säger Andreas.

Andreas anser att dagens byggregler ej är tillräckliga för att hantera dagens energilager. Det är bland annat därför Volvo har satt högre krav på sina egna regelverk. Dessa är dock inte så precisa vad gäller energilagring med li-jon-batterier än, säger Andreas. De har dock identifierat risken med energilager och ställt krav på egen brandcell vid lagring av batterier. Utvecklingen följs ständigt i jakt på ny kunskap inom området, speciellt från NFPA.

Riskbild

Andreas uttrycker en viss oro kring riskerna som uppstår då man placerar ett energilager i ett bostadshus där sovande personer vistas. Det är stor skillnad mellan bostäder och byggnader där det endast förväntas vara vakna individer, vilket är fallet för Volvo, menar han.

Personsäkerheten bör beaktas som skyddsmål vid projektering av framtida energilager. Vi har goda kunskaper om hur till exempel fibrösa material brinner och hur de frigjorda gaserna påverkar oss, men så är inte fallet med li-jon-batterier. Det existerar fortfarande mycket oklarheter kring dessa brandförlopp och gaserna som frigörs, samt vad de har för skadliga effekter på oss människor.

Brandtekniska åtgärder

Största problemet med att energilager inte är reglerat i någon lagstiftning har att göra med dess användning i bostäder relaterat till sovande personer. Risken blir så pass stor att man ej kan acceptera den, anser Andreas. Speciellt om de placeras i källarplan. Så vitt Andreas vet är detta förbjudet i vissa länder.

Att klassa ett sådant utrymme är inte självklart på grund av batteriernas häftiga effektutveckling och särpräglade brandförlopp, säger Andreas. Det är orimligt att tänka sig att batterierna ska få brinna ut, de kan då förstöra väldigt mycket runt omkring. Om det skulle klassas med dagens regelverk hade han kanske klassat det som V_k 6, men det känns inte riktigt rätt, uttrycker han.

Egen brandcell känns som en bra början, men ventilationen blir också mycket viktigt i ett sådant utrymme då gaserna som frigörs är väldigt giftiga, säger Andreas. Brandgastrycket kan också vara en viktig parameter att kolla på.

Branden i dessa batterier skiljer sig väldigt mycket från den fibrösa branden. Batteribränder, där termisk rusning inträffat, är mycket intensivare. Därför är de befintliga ventilationslösningarna i många fall inte bra nog, de kommer förmodligen inte räcka till för att hantera ett sådant scenario.

Vidare så tar Andreas upp utformningen av vad som finns inuti rummet, alltså hur en brand kan spridas från ett batteripack till ett annat. Detta är en mycket väsentlig fråga där man kan göra mycket skillnad.

Bilaga B8

Datum: 15/10/19

Namn: Anders Johansson

Företag: Boverket

Yrkesroll: Brandingenjör. Arbetar med brandavsnittet i Boverkets byggregler (BBR).

Li-jon-batterier

Gällande risker och utmaningar kring li-jon-batterier delar Anders upp det i två huvudrisker. Dels handlar det om utsläppen av farliga gaser, dels handlar det om elsäkerhetsrisker. Elsäkerhetsriskerna kan bestå av att det exempelvis går likströmsledningar i byggnaden från solcellspaneler till batterierna som kan slitas och ge upphov till rena elsäkerhetsrisker. Anders säger att ett problem med bränder i li-jon-batterier är att när de väl har släckts kan de återantändas när man till exempel flyttar på batteriet en vecka senare (på grund av termisk rusning).

Energilagring

Anders kommer i kontakt med olika typer av energilagring inom sitt yrke av olika anledningar men det är inget som de reglerar i BBR. Anders anser inte att dagens byggregler är tillräckliga för att hantera energilager med li-jon-batterier utan att man får snarare läsa och tolka allmänna delar, och kanske framförallt det som rör brandcellsindelning. Byggreglerna är av naturliga skäl inte skrivna för att kunna hantera energilager med li-jon-batterier då reglerna har tillkommit innan tekniken har implementerats.

Riskbild

Enligt Anders är pannrum det närmsta man kan jämföra dessa typer av energilager med, men han menar att det är svårt att säga vilket av dem som medför högst risk. När båda systemen fungerar kan nog en panna som eldas med bränsle utgöra en större risk, men när det väl brinner antyder Anders att ett batteripack förmodligen kan vara farligare.

Anders säger att ett energilager inte bör vara placerat så det kan blockera en utrymningsväg. Ur ett räddningstjänstperspektiv bör det heller inte vara placerat längst in i byggnaden, så att det kan bli svårt att komma åt.

Brandtekniska åtgärder

Anders menar att det är ett problem att energilager med li-jon-batterier inte är reglerade i BBR eftersom det finns risker med dem, som många varnar för. Det är ett stort arbetsmiljöproblem för räddningstjänst och det är ett stort säkerhetsproblem att personer börjar installera dem i sina bostäder.

Enligt Anders är det svårt att säga vilken klassning ett energilager med li-jon-batterier ska gå under. Det går inte att klassa under en verksamhetsklass eftersom den exempelvis ingår i verksamhetsklass tre när den är placerad i en villa och ingår i verksamhetsklass ett när är placerad i en industri. Man skulle istället kunna införa ett nytt begrepp för dessa utrymmen och klassa dem på liknande sätt som man klassar till exempel avskilt pannrum och garage, att det finns regler som gäller för dem utan att de tillhör någon specifik verksamhetsklass.

När man ska projektera för ett energilager med li-jon-batterier är det viktigt att tänka på säkerheten från båda hållen, att en brand som startar i ett batteri inte ska påverka ett närliggande rum. Men även att en brand som startar på annan plats inte ska sprida sig till energilagrets batterier.

Bilaga B9

Datum: 18/10/19

Namn: Per-Ola Malmquist

Företag: Utkiken.net

Yrkesroll: Brandingenjör som jobbar med omvärldsbevakning med målgrupp kommunal räddningstjänst, Grundare av Utkiken.net

Li-jon-batterier

Li-jon-batterier är något som varit på Per-Olas agenda mycket det senaste, något han har försökt sätta sig in i rejält. Han var en av de första som knöt samman vätefluorid-problematiken med räddningstjänstens insats efter att MSB i en rapport omnämnt med att larmställen inte är gjorda för att motstå denna gas. Dock konstaterade MSB också att detta ej var ett problem så länge dessa bränder släcks utomhus. Per-Ola började då fundera på frågeställningen angående om dessa bränder skedde inomhus, i till exempel ett energilagrar.

De främsta riskerna med den ökande användningen av dessa batterier ligger hos batterityper som används i elcyklar och andra produkter nära hemmet, menar Per-Ola. Bostäders brandskydd är nämligen dimensionerade för en vanlig t^2 -kurva där branden växer sig större långsamt vilket ger tid för brandvarnare att larma och personer att utrymma. Detta är inte fallet med dessa batterier då man får en väldigt kraftig utveckling av brand och rök med en gång, som också är giftig. Detta kan leda till att personer inte hinner ut i tid vid denna typ av brand, säger Per-Ola.

Vidare så tar Per-Ola upp problematiken med garage som är sammanbyggda med shoppingcenter och bostäder, där det inte finns några regler för hur eller var man ska parkera exempelvis bilar med li-jon-batterier. Detta kan troligen fungera men det krävs att man tänker efter noga innan man bygger då (byggregler hade underlättat), anser Per-Ola.

Det finns många risker som bör beaktas vad gäller termiska rusning, speciellt då uppkomsten av vätefluorid, särskilt för räddningstjänstens del. FOI (Totalförsvarets Forskningsinstitut) har släppt en rapport som undersökt hur larmställen står emot denna gas, och kommit fram till en viss tid som de gör det. Denna forskning säger Per-Ola inte är tillräckligt då man endast kollat på textilernas genomsläpplighet. Enligt Per-Ola är skarvarna i larmställen de stora problemen, det är där den stora mängden gaser och partiklar kommer in enligt amerikansk forskning.

Man måste också skilja mellan gasen vätefluorid och när denna gas är löst i vatten (Fluorvätesyra), som kan vara fallet då den kommer i kontakt med svett på huden. Dessa ämnen ger inte alltid akuta toxiska problem utan kan ge upphov till fördröjda effekter så som benskörhet och annat.

Viss problematik ligger också kring hur man skall släcka bränder i dessa batterier, då många av dem är designade med väderskydd som förhindrar att vattnet når ända in. Per-Ola anser att taktiken ej bör vara att släcka, utan snarare begränsa branden tills det brunnit ut. Skydda vad som finns runt omkring. Lättskum kan vara ett bra alternativ istället för att spruta på flera tusen liter vatten som förorenar omgivningen.

Energilagring

Energilagring är något som Per-Ola stöter på mycket ofta i sitt arbete med Utkiken.net, och besitter således en hel del kunskap om ämnet. Han tar upp det faktum att det finns många olika sorters energilagrar, exempelvis UPS. Dessa har länge bestått av bly-syra-batterier, men enligt Per-Ola blir li-jon-batterierna även vanligare för detta fenomen. Vid detta batteribyte tas ingen hänsyn till den ökade risk som li-jon-batterierna faktiskt utgör för personer i byggnaden, säger Per-Ola.

Dagens byggregler är inte anpassade för att hantera energilagring med li-jon-batterier. De tar inte höjd för de giftiga gaserna som kan produceras när dessa batterier brinner, menar Per-Ola. Man bör ha ett tankesätt som liknar det man har kring avskilda pannrum, där ett energilager också regleras separat.

Riskbild

Riskerna med att placera ett energilager inuti en byggnad är jättestora anser Per-Ola. Exempelvis så kan företag med solceller på taket vilja visa hur energisnåla de är genom att placera sina batterier i foajén (med någon tillhörande display som visar energisparandet), så deras kunder kan se dem. På detta vis kan den mest troliga utrymningsvägen slås ut i byggnaden vid en eventuell brand i dessa batterier. Placeringen är därför av yttersta vikt när man projekterar ett energilager.

Per-Ola återgår till problematiken med UPS och bytet av batterier i dessa. Den vanliga ventilationen kommer ej vara tillräcklig för att hantera gaserna som släpps ut i rummet, och dörren är ej klassad så den kommer läcka ut gaserna i en eventuell utrymningsväg, då ett UPS-rum kan placeras vart som helst inom en byggnad.

Enligt Per-Ola kan man ha samma skyddsmål för energilager som man redan har i BBR i dagsläget; människors hälsa och säkerhet. Alla skall kunna utrymma på ett säkert sätt. Om man vill uppnå dessa skyddsmål så måste man reglera energilagrets placering, men det kan också komma att ställa krav på vart man får ställa elcyklar och permobiler, säger Per-Ola. Man bör försäkra sig om att människor kommer ut levande, då har man kommit långt, menar Per-Ola.

Enligt Per-Ola så utgör ett energilager en större risk inuti en byggnad jämfört med ett avskilt pannrum. Brandförloppet ligger på en annan, kanske lägre, nivå och de giftiga gaserna som troligen är giftigare än en vanlig pannrumsbrand gör att ett energilager kräver mer eftertanke och dimensioneras på ett annat sätt än ett pannrum. Energilager bör därför regleras i BBR, menar Per-Ola.

Brandtekniska åtgärder

Ett minimumkrav på utrymmet som huserar ett energilager bör vara att det skall kunna hantera det brandförlopp som man kan förvänta sig av den mängden batterier det innehåller. Detta kommer naturligtvis skilja sig från utrymme till utrymme beroendes på vad det innehåller för typ av batterier, samt dess mängd. Branden skall alltså kunna brinna klart i utrymmet utan att utrymning påverkas från byggnaden. Gaserna bör därför ventileras bort eller tas om hand för att inte skada utrymmande människor eller räddningstjänst. En insats bör vara genomförbar från utsidan, alternativt att räddningstjänsten skall kunna se till att branden inte sprider sig till andra utrymmen inifrån.

Effektutvecklingen från dessa batterier är inte hiskeligt hög, men brandförloppet håller på väldigt länge. Kraven på brandcellsgränserna behöver således inte vara jättestora för att klara av att hålla inne branden. Dock så kommer man inte klara av rökspridningskraven om man inte förser utrymmet med exempelvis ventilation alternativt sprinklers som ”tvättar ner” gaserna (då borde findimmsprinklers användas då det kan bli problem med för mycket förorenat vatten från en vanlig). Det senare är dock inget som finns idag och behöver forskas mer på.

Avslutningsvis så poängterar Per-Ola ut att det är ett annorlunda tankesätt man bör ha när man projekterar energilager med li-jon-batterier för att åtgärderna skall vara skäligen ur ett kostnadsnyttoperspektiv. Det kommer krävas helt annorlunda åtgärder om det placeras i källaren jämfört med på taket, menar Per-Ola.

Bilaga B10

Datum: 22/10/19

Namn: Anders Lundberg

Företag: MSB

Yrkesroll: Brandingenjör, biträdande enhetschef för stöd till kommunal räddningstjänst

Li-jon-batterier

Anders besitter en bred kunskap vad gäller li-jon-batterier, något de får frågor om varje dag från exempelvis brandkonsulter, byggherrar och räddningstjänster. Faran med dessa batterier är den avgasning eller tryckavlastning som kan ske när dessa batterier utsätts för temperaturer utanför deras optimala arbetsförhållanden. Detta kan i sin tur leda till termisk rusning, vilket är en reaktion som är mycket svårsläckt. Vidare så tar Anders upp problemet med vätefluorid och dess toxicitet vilket kan orsaka skada för räddningspersonal och andra. Detta är dock i huvudsak kopplat till batterier i elbilar, säger Anders.

Energilagring

Energilagring stöter Anders på rätt så frekvent i sin arbetsvardag, dock inte lika mycket som li-jon-batterier. Det kommer in mer och mer frågor relaterat till energilager inom fastigheter och riskerna med detta, men många av dem är relaterat till elfordon och hur dessa skall hanteras i garage och liknande. Vidare så berättar Anders att det i fastigheter kan återanvändas gamla bilbatterier för energilagring då man inte har samma prestandakrav där.

Relaterat till om byggreglerna i dagsläget kan hantera energilager konstaterar Anders att det existerar mycket få detaljerade regler kring detta område. Vidare så tar han upp en rapport som togs fram av Boverket för inte så länge sen, där det konstaterades att det skulle behöva tas fram riktlinjer och anvisningar för brandskydd inom området. Detta skulle tas fram med hjälp av berörda myndigheter; Boverket, MSB, Elsäkerhetsverket och Energimyndigheten. MSB instämmer med slutsatsen av denna rapport.

Riskbild

Den toxiska rökutvecklingen är en av de största riskerna vad gäller energilagring inuti byggnader, uttrycker Anders. Ett större energilager bör absolut inte läggas i anslutning med en utrymningsväg, anser Anders. Det bör istället behandlas ungefär som ett pannrum med egen brandcell, menar han.

Skyddsmål bör vara att människor skall kunna utrymma på ett säkert sätt innan kritiska förhållanden nås. Om man inför ett energilager i en byggnad skall inte människor utsättas för en större risk, den får alltså inte höjas.

Ett energilager bör ses på samma sätt som ett avskilt pannrum vad gäller riskbilden, menar Anders. De är inte helt lika, men är i ungefär samma storlek vad gäller energiinnehållet. Anders drar en parallell till en elbil vs en dieselbil, där energiinnehållet i tanken respektive batteriet är jämförbart. Anders refererar till en graf som tagits fram av Elsäkerhetsverket som visar på detta.

Brandtekniska åtgärder

Problemet med att det inte är det minsta reglerat i dagsläget är att det uppstår en hel del osäkerheter kring hur man skall hantera dessa i många projekt. Det hade underlättat om det fanns något typ av föreskrift eller om det vore reglerat i BBR, anser Anders. Man kan dock tycka att LSO täcker upp detta med att det skall finnas ett skäligt brandskydd i alla typer av byggnader, antyder Anders.

Vidare så tar Anders upp ett exempel med Norge, där elbilsflottan är mycket stor, och där statistiken visar att dessa bilar inte är med i fler olyckor/bränder än andra fordon. Behovet har därför inte uppkommit att reglera det byggnadstekniska skyddet på exempelvis ett garage relaterat till elbilar.

Anders understryker jämförelsen med pannrummet relaterat till hur ett energilager bör klassas/benämnas. De är inte helt olika varandra, menar han. Energilagret bör därför placeras i en egen brandcell, mer specifika åtgärder har inte Anders kunnat läsa sig till att det skulle behövas.

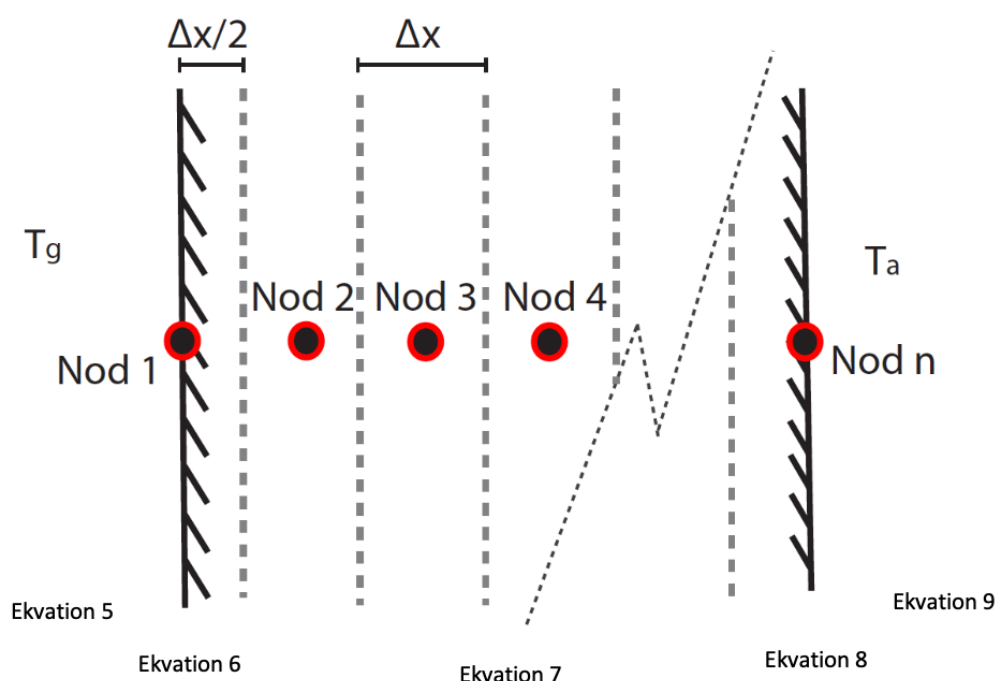
Avslutningsvis tar Anders upp problematiken med ”second use”-batterier, alltså batterier som ofta använts i bilar och som sedan vill återanvändas i olika applikationer, energilager inkluderat. Det finns många sätt batteriet kan ha skadats på (exempelvis deformationer), utöver den sämre prestandan på grund av slitning, vilket kan leda till termisk rusning.

Bilaga C

Dimensionering och verifiering av brandcellsvägg

Samtliga beräkningar utfördes i programmet Excel. Väggen mot energilagret delades upp i olika element, med tjocklek Δx , längs väggens djup där varje element representerades av en nod. I detta fall delades väggen upp i 13 olika noder där dess temperaturer beräknades var tionde sekund, vilket ges av Δt . Figur 8 visar hur väggen delats upp i olika noder, från 1 till n, enligt denna beräkningsmodell. En numerisk beräkning av värmetransport genom väggen utfördes där den brandexponerade sidan var utsatt för varma brandgaser, vars temperaturutveckling följde ISO 834, enligt *Ekvation 5*.

$$T_g = 293 + 345(\log(8 * t + 1)) \quad (\text{Ekvation 5})$$



Figur 8: Översiktsbild på hur ekvationerna används för att beräkna väggens temperatur.

Väggens ytemperatur för varje tidssteg (10 sekunder) beräknades genom *Ekvation 6*.

$$T'_1 = \left(\frac{\varepsilon\sigma(T_g^4 - T_1^4) + h_{hot}(T_g - T_1) - \frac{k(T_1 - T_2)}{\Delta x}}{\Delta x} \right) \frac{2\Delta t}{\rho c_p} + T_1 \quad (\text{Ekvation 6})$$

Där:

T'_1 = Temperatur i nod 1 efter ett tidssteg [K]

T_1 = Temperatur i nod 1 vid nuvarande tidssteg [K]

T_2 = Temperatur i nod 2 vid nuvarande tidssteg [K]

T_g = Gasens temperatur på den brandexponerade sidan [K]

ε = Den varma gasens emissivitet

σ = Stefan Boltzmanns konstant

h_{hot} = Värmeövergångskoefficienten på exponerad sida [$W/m^2 K$]

k = Betongens konduktivitet [W/m K]

ρ = Betongens densitet [kg/m³]

C_p = Betongens värmekapacitet [J/kg K]

Δt = Tid mellan varje ny mätning [s]

Temperaturen i nod i för varje tidssteg, där i går från 2 till 12 beräknades genom *Ekvation 7*.

$$T'_i = \frac{k(T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}) \Delta t}{\Delta x^2 \rho c} + T_i \quad (\text{Ekvation 7})$$

Där:

T'_i = Temperaturen i nod i efter ett tidssteg [K]

T_i = Temperaturen i nod i vid nuvarande tidssteg [K]

T_{i+1} = Temperaturen i nod $i+1$ vid nuvarande tidssteg [K]

T_{i-1} = Temperaturen i nod $i-1$ vid nuvarande tidssteg [K]

Temperaturen i nod 13 representerar yttemperaturen på sidan mot energilagret och beräknades för varje tidssteg med *Ekvation 8*.

$$T'_{13} = \left(\frac{h_{cold}(T_a - T_{13}) - \frac{k(T_{13} - T_{12})}{\Delta x}}{\Delta x} \right) \frac{2\Delta t}{\rho c} + T_{13} \quad (\text{Ekvation 8})$$

Där:

h_{cold} = Värmeövergångskoefficienten på icke exponerad sida [W/m² K]

Ekvation 9 använde rummets lufttemperatur (T_a) i aktuellt tidssteg (t) för att beräkna lufttemperaturen i efterföljande tidssteg, där $T_a = 293$ K vid $t=0$.

$$T_{a(t+1)} = T_a + \frac{\dot{q}'' A_{vägg} \Delta t}{\rho_l C_v V} \quad (\text{Ekvation 9})$$

Där:

$T_{a(t+1)}$ = Lufttemperaturen i efterföljande tidssteg [K]

T_a = Lufttemperaturen vid nuvarande tidssteg [K]

\dot{q}'' = Värmeledning per ytenhet [W/m²]

$A_{vägg}$ = Area på energilagrets väggyta som är brandexponerad [m²]

ρ_l = Luftens densitet [kg/m³]

C_v = Luftens värmekapacitet [J/mol K]

V = Volym på energilagret [m³]

Ekvation 10 användes för att beräkna hur mycket energi som överfördes från väggen till luften. Detta för att sedan användas i *Ekvation 9* för att beräkna hur mycket luftens temperatur förändras mellan varje tidssteg.

$$\dot{q}'' = h_{cold}(T_{13} - T_a)$$

(Ekvation 10)

Beräkningen ger en numerisk lösning där temperaturen ges i olika steg för olika djup och tidpunkter, det vill säga olika Δx och Δt . De indata som är konstanta genom alla djup och tidpunkter ges i Tabell 5.

Tabell 5: Indata som är konstant för samtliga beräkningar.

ε	1
σ	$5,67 \cdot 10^{-8}$
h_{hot}	$25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
h_{cold}	$15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
k	$1,5 \text{ W/m K}$
ρ	2000 kg/m^3
C_p	880 J/kg K
$A_{vägg}$	18 m^2
C_v	1000 J/mol k
V	24 m^3

Antaganden

Energilagrets yttre vägg är exponerad för en värmeökning som följer en ISO 834 – kurva, vilket motsvarar en normal rumsbrand. En del av den värmeökningen sker bland annat via strålning från branden, där emissiviteten (ε) har satts till 1, vilket i verkligheten är lägre. Dock används detta värde vanligtvis för att erhålla ett mer konservativt resultat.

I beräkningarna har energilagrets omslutningsarea och volym utgjort parametrar som kan påverka resultatet. Dimensionerna har satts till $2 \cdot 4 \cdot 3$ meter, vilket ger en rumsvolym på 24 m^3 . Branden antas angripa två av energilagrets fyra väggar, vilket har gjort att omslutningsarean endast har utgjorts av två väggar. Det visar sig att storleken på rummet och förhållandet mellan rumsvolymen och omslutningsarean har relativt liten betydelse för resultatet, så länge storleken är inom rimliga gränser. Om exempelvis dimensionerna dubblas till $4 \cdot 8 \cdot 6$ meter erhålls en rumsvolym på 192 m^3 , vilket resulterar i en lufttemperatur på $52,5 \text{ }^\circ\text{C}$, istället för $58,2 \text{ }^\circ\text{C}$ som erhöles vid de tidigare angivna dimensionerna.

Bilaga D

Beräkningarna utgick från testdata tagit från ”Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests” där fem Li-jon-pouchceller med en ursprungsvikt på 1230 gram fick brinna i 30 minuter. I denna dimensionering av nödventilation fick en batteribrand inom energilagret representeras av resultatet från testet, dock antogs dubbla mängden celler. Pouchcellerna förlorade 350 gram i form av gas under 30 minuter i testet, vilket resulterade i att beräkningarna nedan utgick från dubbla mängden, 700 gram gas.

Ur testet framgår inte mängder och fördelning av gaser som släpptes ut, men vätefluorid var något som uppmättes mer noggrant. Vätefluorid har molmassan 20,01 g/mol och i beräkningarna användes denna för all utsläppt gas, ett antagande som ansågs vara konservativt då vätefluorid är en relativt lätt gas. Totalt bildades 35 mol gas, vilket beräknades genom *Ekvation 11*.

$$n = \frac{m}{M} \quad (\text{Ekvation 11})$$

Ideala gaslagen deriverades sedan med avseende på tid för att få ekvationen tidsberoende, se *Ekvation 12*. Trycket sattes konstant då ingen tryckupbyggnad tilläts i energilagret. Då volymen deriverades erhöles flödet av gas som släpptes ut från de tio pouchcellerna. Detta flöde gavs då i m³/s och visas i *Ekvation 1*.

$$P \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial t} RT \quad (\text{Ekvation 12})$$

$$\dot{V}_{mol} = \frac{\frac{\partial n}{\partial t} RT}{P} \quad (\text{Ekvation 1})$$

Då pouchcellerna brann ökade temperaturen i rummet, vilket gav upphov till en volymexpansion av luften. Volymexpansionen kan liknas vid ett flöde och beräknades med *Ekvation 2* där tillväxtkonstanten beräknas med hjälp av *Ekvation 3*. Tillväxtkonstanten α beror på antal celler n .

$$\dot{V}_b = 0,0081 * \alpha^{0,4231} A^{0,5009} h^{1,0394} \quad (\text{Ekvation 2})$$

$$\alpha = n^{1,26} * 1,25 \quad (\text{Ekvation 3})$$

Ekvation 1 och *Ekvation 2* ger två flöden som slogs ihop, enligt *Ekvation 4*, för att tillsammans ge det flöde som behövde ventileras ut om trycket skulle förbli konstant.

$$\dot{V}_{tot} = \frac{\frac{\partial n}{\partial t} RT}{P} + 0,0081 * \alpha^{0,4231} A^{0,5009} h^{1,0394} \quad (\text{Ekvation 4})$$

\dot{V}_{tot} blir då det dimensionerade flödet för nödventilationen som fordras i ett energilager med golvarean A och takhöjden h , där n stycken Li-jon-batterier brinner. Se Tabell 6 för samtliga indata.

Tabell 6: Indata för samtliga beräkningar.

n	35 [mol]
m	700 [g]
M	20,01 [g/mol]
P	101 000 [Pa]
R	8,3145 [J/mol K]
T	293 [K]
t	1800 [s]
A	8 [m ²]
h	3 [m]