

Forslag til brandtekniske krav til BESS og oplag af litium-ion batterier

Udarbejdet af: Pascall Qvistgaard Christensen, Daniel G. J. C. Eriksen
Jesper Wedel Jensen, Søren Brøndtoft
Kontrolleret af: Tim Andersen
Dato: 05.10.2022
Version: 00
Projekt nr.: 1017544

Indholdsfortegnelse

1	Introduktion	5
2	Ordliste.....	6
3	Generelt om litium-ion batterier.....	8
4	Relevant vejledning fra udlandet	10
4.1	NFPA 855 Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems (Nordamerika).....	10
4.1.1	Generelt	10
4.1.2	Udendørsoplag af tilsluttet BESS	11
4.1.3	Oplag af brugte, ikke tilsluttede batterier	11
4.2	Risikovurdering og håndtering av brann i Litium-ion batterier (Norge)	11
4.3	Anbefalinger fra tyske forsikringsselskaber	12
5	Seneste relevante forskning	14
5.1	FM Global: Development of Protection Recommendations for Li-ion Battery Bulk Storage: Sprinklered Fire Test	14
5.2	FM Global: Development of Sprinkler Protection Guidance for Lithium Ion Based Energy Storage Systems.....	14
5.3	Sverige: Brannrisiko ved lagring av ikke-tilkoblede litium-ion og litiumbatterier	15
5.4	Norge: Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression	16
5.5	Brandbelastning, brandeffekt og brandtilvækst.....	17
5.6	Udledning af giftige gasser.....	19
6	Diskussion af nyeste viden.....	20
6.1	Samlet kapacitet af BESS.....	20
6.1.1	Oplag ift. relevante vejledninger og forsikringsselskaber	20
6.1.2	Kapacitet ift. konsekvenser.....	20
6.1.3	Detektering	21
6.1.4	Kapacitet ift. en risikovurdering.....	21
6.2	Aktive anlæg	23
6.2.1	Automatisk vandsprinkling	23
6.2.2	Ventilation af eksplosive gasser.....	24
6.3	Håndtering af brugte batterier	24
6.4	Placering i en bygning	24
6.4.1	Placering i afsnit med kælderfunktion.....	24
6.5	Placeringer i det fri eller i container	25
7	Indsatsforhold.....	26
8	Sammenfatninger af anbefalinger.....	27

8.1	Anbefalinger ved BESS installationer	31
8.1.1	Placering i bygninger.....	31
8.1.2	Placering udendørs	32
8.2	Anbefalinger ved lager af litium-ion batterier	33
8.2.1	Placering i bygninger.....	33
8.2.2	Placering udendørs	33
8.3	Anbefalinger ved opmagasinerings af brugte litium-ion batterier.....	34
9	Referencer	36

1 Introduktion

Nærværende rapport er udarbejdet for Beredskabsstyrelsen med henblik på at kvantificere og kortlægge relevant og nutidig forskning vedrørende brandsikring af litium-ion oplag. Rapportens hovedfokus er litium-ion oplag i form af *Battery Energy Storage Systems (BESS)* samt fokus på løst oplag af litium-ion batterier, både nye og udtjente.

Rapporten vil give konkrete forslag til brandtekniske løsninger for at opnå et acceptabelt sikkerhedsniveau ift. brand og eksplosion. Der vil blive set på forebyggende tiltag for at reducere sandsynligheden for at en brand opstår, reduktion af risikoen for brandspredning, reduktion af konsekvenserne samt sikre indsatsmulighederne for redningsberedskaberne. Der ses desuden på brandsikkerheden for placeringer af litium-ion batterier både i bygninger og i det fri.

Opbygningen af litium-ion batterier med de komponenter, herunder kemiske komponenter, som har en betydning for brand eller eksplosion, gennemgås.

Rapportens indhold skal læses i sammenhæng med beredskabets indsatsforhold. Flugtvejsforhold for personer i bygningen berøres men kun i mindre omfang. Rapporten kan benyttes som baggrundsviden til Beredskabsstyrelsen for eventuelle fremtidige vejledninger vedrørende brandsikring, herunder indsatsforhold, når der er litium-ion batterier i en bygning eller udendørs oplag.

Rapporten tager udgangspunkt i nugældende batteriteknologier, regler og forskning. Da der sker en stor udvikling af litium-ion batterier, bør der løbende være en opdatering af eventuelle risici. Der er en stor udvikling inden for batteriernes energitæthed, hvilket potentielt kan betyde større konsekvenser for den enkelte battericelle ved uheld. Her skal det forstås, at energitætheden og brandeffekten er proportionel. Omvendt forskes der også i mere sikre batteriteknologier, hvilket kan sænke risikoniveauet. F.eks. forskes der intenst i batterityper med en fast elektrolyt (solid state batterier), hvilket sandsynligvis vil have betydning for risici i forbindelse med brand og endda potentielt sænke dem gevaldigt.

Denne rapport fokuserer ikke på fremtidige batteriteknologier eller udviklinger af nuværende teknologier, da risici for disse er uforudsigelige. Derfor fokuserer denne rapport alene på litium-ion batterier med flydende elektrolyt.

Rapporten er opbygget så kapitel 3-7 beskriver generelt om litium-ion batterier, nugældende regler, vejledninger samt forskning, indsatsforhold og diskussion af den nyeste viden. Kapitel 8 sammenfatter anbefalingerne til brandsikring for tilsluttede batterier, ikke-tilsluttede batterier og brugte batterier.

2 Ordliste

Anode: Den negative elektrode på batteriet.

Batteri: Batteri består af flere battericeller, som er koblet sammen. Kan desuden indeholde BMS.

Battericelle: Battericelle er den mindste enhed i et batteri og består af anode, katode, elektrolyt og membran. Kan også være udstyret med forskellige sikkerhedsanordninger som PTC eller CID.

BMS: Battery Management System, styresystem for et batteri der bl.a. sikrer op- og afladninger og er en vigtig del af at beskytte batteriet mod fejl.

BESS: Battery Energy Storage System. Installation eller anlæg bestående af én eller flere battericeller til at oplagre energi. Oplades ofte af vedvarende energikilder som vindmøller eller solceller og lagrer energien til den skal benyttes. Kan også dække over UPS-systemer.

CID: Current Interrupt Device. En sikkerhedsanordning på battericeller, som frakobler strømmen ved højt tryk i batteriet.

Elektrolyt: Et opløsningsmiddel, der sikrer at ionerne kan flyde frit mellem anode og katode.

Energitæthed: Hvor meget energi, som batteriet kan indeholde i forhold til vægten eller volumen af batteriet.

ESS: Energy Storage System. Oplagringsmetoden er ikke specificeret til batterier modsat BESS (Se BESS).

IDLH: Immediately Danger to Life or Health. Atmosfære, der er en fare for liv eller helbred.

Katode (herunder også katodematerialer): Den positive elektrode på batteriet. Materialet som kato-den opbygges af, benyttes ofte til at betegne batterikemien for litium-ion batterier. Eksempler herpå er LFP, LNO, LMO, NMC m.fl.

kWh: kilo watt timer. Enhed til angivelse af energi kapacitet i bl.a. batterier. For angivelser i ampere timer (Ah) og spænding (V) kan kWh bestemmes som $kWh = \frac{V \cdot Ah}{1000}$.

LEL: Lower explosive limit. Laveste volumenkoncentration, hvor gas kan antændes

LiPF₆: Litiumhexafluorfosfat. Elektrolytten i litium-ion batterier består for det meste af Litiumhexafluorfosfat (LiPF₆) i et organisk opløsningsmiddel af cykliske estere.

Litium-ion batteri: Batteri baseret på litium-ioner, der bevæger sig mellem anode og katode.

LFP: Litium-Jern-Fosfat.

LNO: Litium-Nikkel-Oxid. Katodekemi i litium-ion batterier.

LMO: Litium-Mangan-Oxid. Katodekemi i litium-ion batterier.

Membran: Sikrer, at anode og katode ikke kan få kontakt til hinanden og derved kortslutte battericellen.

NMC: Nikkel-Mangan-Kobolt. Katodekemi i litium-ion batterier.

PHRR: Peak heat release rate. Største effekt for energiudladning ved brand.

PTC: Positive Temperature Coefficient. Beskyttelsesanordning på den enkelte battericelle.

SOC: State of charge. Opladningsgraden, måles i procent.

Solid state: Batteriteknologi, hvor elektrolytten er fast stof.

TR: Thermal runaway. En tilstand, hvor et batteri er blevet så varmt, at der sker en exoterm reaktion i batteriet og temperaturen på batteriet stiger.

ULF: Upper flammability limit. Højeste volumenkoncentration, hvor gas kan antændes.

UPS: Uninterruptible power supply. Strømforsyning på batteri som benyttes f.eks. ved strømafbrud af den offentlige el-forsyning.

3 Generelt om litium-ion batterier

Litium-ion batterier dækker over et bredt begreb, som hverken begrænses til en enkelt kemisk opbygning eller geometri. Generelt set skal opbygningen af litium-ion batterier forstås således, at et system består af flere moduler, og hvert modul består af flere battericeller.

Litium-ion battericeller består af anode, katode, elektrolyt, membran og i visse tilfælde også nogle beskyttelsesanordninger. Anoden består ofte af grafit og andre kulstof materialer. Katodematerialerne er opbygget af forskellige kemier som er litium-ion oxider. Ofte betegnes varianter af litium-ion batterier efter deres katodekemier. De typiske katodematerialer Nikkel-Mangan-Kobolt (NMC) og Litium-Jern-Fosfat (LFP). Elektrolytten i litium-ion batterier består for det meste af Litiuhexafluorfosfat (LiPF_6) i et organisk opløsningsmiddel af cykliske estere. Membranen ligger mellem anoden og katoden og sørger for at de to ikke kan få kontakt til hinanden og kortslutte. Membranen tillader samtidigt at litium-ioner kan passere.

Battericeller forekommer typisk som cylindriske, prismatiske eller som poser (eng. *pouches*). Brandeffekten af et batterisystem er afhængig af den totale mængde involverede battericeller. Flere battericeller medfører risiko for at mere energi udledes og brandeffekten stiger ligeledes. Den konkrete udformning af batteriet har derfor stor indflydelse på systemets brandegenskaber.

En litium-ion battericelle kan overgå til *thermal runaway (TR)*, hvis der har været forudgående svigtårsager (eksempler herpå er oplistet nedenfor). TR er principielt et fænomen, hvor temperaturen i den enkelte celle stiger kraftig og der udledes brandbare og giftige gasser. Den primære drivkraft er en række eksotermiske kemiske reaktioner, der initieres ved forskellige temperaturer, om som involverer både anode, katode og opløsningsmiddel (elektrolyt). Ved tilstrækkelig opvarmning af den enkelte battericelle, kan processen fortsætte til naboceller, hvormed TR kan ske totalt i BESS.

TR kan opstå pga. flere årsager. Her er de mest sandsynlige årsager:

- Battericellen opvarmes fra en ekstern varmekilde. Ofte starter TR ved omkring 160 °C, hvor TR sker meget hurtigt, men kan også ske ved længerevarende opvarmninger. Længerevarende opvarmning over dage eller uger på helt ned til 70 °C kan også initiere TR.
- Fysisk/mekanisk skade, som medfører intern kortslutning.
- Intern kortslutning, som sker i den enkelte battericelle mellem anode og katode. Der kan ske grundet produktionsfejl eller en mekanisk påvirkning.
- Ekstern kortslutning som sker i batteriets elektronik eller anden teknik tilknyttet batteriet.
- Forældede batterier, hvor fysiske elementer kollapse, kan give anledning til TR. Primært relevant ved oplag af udtjente batterier (genbrugsstation).
- Overafledning, hvor battericellerne forsøges at blive afladet under 0 volt.
- For hurtig afladning, hvor battericellerne aflades i et hurtigere tempo end de er designet til.
- Overopladning, hvor battericellerne forsøges at blive opladet til mere end deres kapacitet.

Det mest sandsynlige scenarie, hvis der sker udledning af brandfarlige gasser er, at disse antændes enten grundet den høje temperatur eller via gnister i nærheden f.eks. ved brydningen af battericellens indkapsling. I teorien kan der ved udledning af ikke-antændte brandfarlige gasser ske en senere antændelse, som kan forårsage en eksplosion. Det kræver dog at koncentrationerne i rummet kommer over den nedre eksplosionsgrænse (*LEL*). Muligheden for dannelse af en eksplosiv blanding med

luft vurderes ikke som kritisk såfremt der er ventilation på f.eks. med et luftskifte på 0,5 pr. time i oplagsrummet eller at oplagsrummet har et stort volumen. Den enkelte battericelle kan udslynge fragmenter grundet overtrykket i battericellen ligesom der kan ske udslyngning af battericeller fra batteripakken under TR. Cylindriske battericeller vil kunne udslynge små fragmenter fra cellens metal-kappe mens battericeller i poser (pouches) ikke vil have samme risiko for udslyngning af fragmenter.

Brand i litium-ion batterisystemer kan give anledning til store udfordringer ved indsats (slukningsarbejder). Dette kan skyldes flere elementer, hvor særligt gas fra brand i batterier kan være ekstremt giftige. Andre elementer kan skyldes opbygningen af batterisystemerne, der, som førnævnt, består af adskillige battericeller, som kan være vanskelige at få adgang til når TR pågår, hvilket kan gøre det svært at køle branden.

Ydermere, er det i eksperimentelle forsøg blevet fundet, at den specifikke varmekapacitet for batterierne er sammenlignelig med aluminium [Spinner et al., 2015], [EngineeringToolBox, 2003], hvilket betyder, at der skal ydes meget køling, førend batteri temperaturen falder under tærsklen for fortsat TR.

4 Relevant vejledning fra udlandet

Afsnittet deles op i underafsnit, der hver indeholder relevante betragtninger fra vejledninger/retningsslinjer fra udlandet og brancheorganisationer.

4.1 NFPA 855 Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems (Nordamerika)

[NFPA-855, 2020] findes relevant for litium-ion anlæg større end 20 kWh. Anlæg mindre end 20 kWh negligeres, og falder således ikke under bestemmelserne i [NFPA-855, 2020].

4.1.1 Generelt

[NFPA-855, 2020] tillader 50 kWh per litium-ion anlæg, som hver skal placeres med en indbyrdes afstand på 3 ft (914 mm). Dette underordnet, om anlægget er placeret i bygninger eller i det fri. Afstanden skal opretholdes til øvrige bygningsdele og andet oplag. Det er en forudsætning, at bygningsafsnittet er sprinklet, hvor krav til sprinkleranlægget er 12,2 mm/min og et dækningsareal på 230 m². Dette korresponderer med et anlæg efter risikoklasse *High Hazzard Production 3* (HHP3) anlæg efter [DBI-251/4001, 2016].

[NFPA-855, 2020] differentierer mellem bygningens brug. Hvis bygningen er dedikeret til oplag af litium-ion batterier, stilles der ikke grænseværdier til maksimalt oplag i bygningen. Ved bygningsafsnit i bygninger, der ikke er dedikeret til litium-ion oplag, begrænses oplaget i bygningen til 600 kWh for litium-ion batterier.

For dedikerede bygninger placeret mere end 30,5 m fra andre bygninger, offentlige veje, matrikel-skæl og andet brandbart materiale, kan den lokale myndighed give tilladelse til, at bygningen ikke sprinkles.

Ved ikke dedikerede bygninger, skal rum med oplag af litium-ion batteri brandmæssigt adskilles fra øvrige rum med brandmæssige adskillelser på mindst 120 min.

Dedikerede bygninger skal være brandmæssigt fritliggende. Der må kun være personophold, som er direkte relateret til servicering af litium-ion anlæg.

For rum med litium-ion oplag, stilles der krav til, at der skal udføres eksplosionskontrol, der skal projekteres og udføres efter [NFPA-69, 2019].

Der stilles, som udgangspunkt, ikke krav til brandventilation for oplag af litium-ion batterier.

For oplag i parkeringskældre stilles der skærpede krav. Der må ikke placeres BESS nærmere end 15,3 m fra indtag til komfort ventilation. Hvis ventilationsanlægget stoppes af centraludstyr ved detektering af brand, kan afstanden reduceres til 7,6 m. BESS skal placeres i bur, der sikrer fri afstand på mindst 1,5 m fra BESS til yderkant bur, som sikrer mod mekanisk påvirkning.

Der stilles krav til alle elektroniske komponenter, som skal leve op til enten NFPA 70 [NFPA-70, 2017] eller IEEE C2 [C2, 2017]. Opretholdes klassifikationen ikke, skal litium-ion oplaget håndteres som anden batteriteknologi, hvormed krav til oplagsstørrelse i ikke dedikerede bygninger reduceres til 200 kWh, og der stilles krav til mekanisk brandventilation på 5,1 L/sek/m².

4.1.2 Udendørsoplag af tilsluttet BESS

For udendørs oplag differentieres der mellem opstilling nær andre bygninger (nærmere end 30,5 m) eller øde placeringer. For øde placeringer (mindst 30,5 m fra andre bygninger), stilles der ikke begrænsninger til oplagsstørrelser. For placeringer nær andre bygninger, begrænses oplaget til 600 kWh.

Anlæg kan placeres i en container eller lignende, med dimensioner på højst 16,2 m x 2,6 m x 2,9 m. Overskrides de førnævnte dimensioner, skal det håndteres som et ordinært indendørs oplag. Anlæg placeret nær andre bygninger, skal mindst placeres 3,048 m fra andre bygninger. Afstanden kan reduceres til 0,914 m, hvis containeren udføres i ubrændbare materialer, og den nærtstående ydervæg (for nabobygningen) udføres som brandvæg med mindst 120 min brandmodstandsevne. Alternativt, placeres en fritstående brandmæssig adskillelse med 60 min modstandsevne, som udstrækkes 1,5 m over og til hver side af containeren.

4.1.3 Oplag af brugte, ikke tilsluttede batterier

Oplag af brugte batterier beskrives tillige i [NFPA-855, 2020]. Opmagasineringsenheder må ikke være større end 0,03 m³. Opmagasineringsenheder skal placeres med en afstand på mindst 0,9 m fra andre opmagasineringsenheder og andet brændbart materiale. Hvis der placeres brandbart materiale mellem opmagasineringsenheder, skal afstanden mellem opmagasineringsenhederne mindst være 3 m.

4.2 Risikovurdering og håndtering af brann i Litium-ion batterier (Norge)

[Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, 2021] er en vejledning udviklet af Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap i Norge til de norske beredskaber. Vejledningen beskriver risikoforhold og vejledning til håndtering af brand i litium-ion batterier.

Vejledningen inddeler brande i litium-ion batterier i fire grundlæggende risikoniveauer:

- Niveau 1: Brand i mindre litium-ion batteri (PC, mobiltelefon etc.)
- Niveau 2: Brand i større litium-ion batteri (El-bil, El-bus etc.)
- Niveau 3: Brand i større litium-ion batteri i lukket rum (ESS i container eller hus etc.)
- Niveau 4: Brand i større litium-ion batteri ombord på et fartøj eller i større byggeri (Hybrid færge eller større BESS anlæg)

For hvert risikoniveau er der udarbejdet *action-cards*, som nøje beskriver procedurer for beredskabet. Fremgangsmåden beskrives i tre trin:

- Læs ulykken og udarbejd en risikovurdering
- Find en mulig taktik
- Mål med indsats og taktisk plan

Gennemgående for risikoniveau 1 og 2 er, at der bør betragtes en høj risiko for brandspredning, giftige gasser, elektrisk fare, mindre eksplosioner samt høje temperaturer. Den taktiske plan beskrives i grove træk med, at der skal forventes meget vand til slukning, batteriet skal flyttes væk fra andet oplag samt at afbryde strømkilden.

For risikoniveau 3 beskrives det, foruden hvad beskrevet ovenfor for niveau 1 og 2, at eksplosionsfare i høj grad bør betragtes. Ydermere, skal forhold som lysbuedannelse og ætsningsskader betragtes. Den taktiske tilgang beskrives ved indhentning af kompetent personel samt indhentning af resurserpersoner. Der tillægges særlig vægt på eksplosionsfaren ved entre til brandrummet, og der foreskrives, at der ikke skal gøres entre, før der er styr på gaskoncentrationer i rummet.

For risikoniveau 4 tilskrives lignende faremomenter som beskrevet for niveau 1-3. Den taktiske fremgangsmåde beskriver blandt andet, at der skal indhentes informationer om BMS, plantegninger og lignende. Øvrig fremgangsmåde beskrives i lighed med niveau 3. Særlige forhold ved hybridfærger gengives ikke i nærværende beskrivelse.

4.3 Anbefalinger fra tyske forsikringsselskaber

Foreningen af tyske forsikringsselskaber (GDV) har udgivet en vejledning for brandbeskyttelse af litium og litium-ion batterier: [Vds 3103:2019, 2019]. Vejledningen er for oplag af batterier, dvs. ikke-tilsluttede batterier.

Test har vist, at vandsprinkling er velegnet som slukningsmiddel til at begrænse omfanget af en brand i batterier.

Batterierne bliver inddelt i tre niveauer:

- Lav kapacitet: Mindre end 100 Wh pr. batteri. F.eks. computere, små værktøjer, tablets og mobiltelefoner.
- Mellem kapacitet: Mere end 100 Wh og mindre end 12 kg brutto vægt pr. batteri. F.eks. elektriske løbehjul, el-cykler, lette elektriske køretøjer og større haveværktøjer.
- Høj kapacitet: Mere end 100 Wh pr. batteri og/eller mere end 12 kg brutto pr. batteri. F.eks. el-biler og større BESS-anlæg.

Grundlæggende skal følgende overholdes:

- Producentens anvisninger skal følges.
- Forebyggelse af eksterne kortslutninger.
- Forebyggelse af interne kortslutninger.
- Ikke udsætte batterierne for høj varme fra f.eks. varmekilder eller direkte sollys.
- I usprinklede områder skal der være en afstand på 2,5 m til brændbare materialer eller adskilles med en brandmæssig adskillelse.
- Beskadigede batterier skal fjernes.

Kun batterier testet efter UN 38.3 [United Nations, 2019] må opbevares og lagres.

Batterier med lav kapacitet har ingen specifikke sikkerhedsregler, dog skal sikkerhedsreglerne for batterier med mellem kapacitet overholdes ved mængder på mere end 7 m³ eller mere end 6 europaller.

Batterier med mellem kapacitet skal brandmæssigt adskilles eller have en afstand på mindst 5 m til andre produkter. Hvor der er personophold skal rummet udstyres med ABA. Det bør overvejes om der skal installeres egnede slukningsmidler. For mængder hvor oplagsarealet overstiger mere end 60

m² og/eller opbevaringshøjder på mere end 3 m skal sikkerhedsreglerne til batterier med høj ydeevne overholdes.

For batterier med høj kapacitet er der ingen viden om, hvordan disse skal beskyttes. Tænelige foranstaltninger kan dog være adskillelse og kvantitativ begrænsning, opbevaring i egen brandmæssig enhed eller mindst 5 m rumlig adskillelse og automatisk slukningsystem. Det anbefales at brandsikringen sker i samråd med forsikringselskabet.

Vejledningen anbefaler at behandle det som farlige stoffer og tilpasse brandbeskyttelsen til de specifikke batterier.

5 Seneste relevante forskning

Der er megen global forskning af brandsikkerheden for litium-ion batterier. En hel del af denne forskning ser på batterierne på celle niveau eller for enkelte batterikemier. Den forskning på celleniveau er svær at omsætte til anbefalinger til større batterioplag eller BESS. I dette afsnit gennemgås først nyere forskning, hvor der tages udgangspunkt i større oplag. For brandeffekt, brandbelastning, tilvækstfaktor og HF-gasser er der taget udgangspunkt i forskning på mindre batterier og battericeller, da det pt. ikke er muligt at udlede pålidelige data fra forskningsartikler.

Viden fra dette afsnit benyttes til at give vurderinger af hvilke brandsikringstiltag der er mest relevante for større oplag og BESS.

5.1 FM Global: Development of Protection Recommendations for Li-ion Battery Bulk Storage: Sprinklered Fire Test

[Ditch, 2016] omfatter et studie af brandfare ved opmagasinering af ikke tilsluttede litium-ion batterier i emballage stablet i tre lag i pallereoler indtil 4,6 m. Studiet begrænses ved rum indtil 12,2 m loftshøjde, pakkestørrelse på 20 Ah LFP pouch batterier med 50% SOC samt opdeling med hård plast.

Af studiet, der omfatter eksperimentelle resultater, blev det fundet, at det primært er papemballagen, der driver branden i den indledende fase. Prædiktionen af sprinkleraktivering blev tillige fundet til at være retvisende iht. de eksperimentelle erfaringer. Aktivering af sprinkler ved fuldskalaforsøg skete efter 150 sekunder. Med sprinklersystem med aktiveringstemperatur på 74 °C, K-factor på 320 L/min/bar^{1/2}, installeret i 3,0 m gange 3,0 m, med tryk på 2,4 bar og med vandtæthed på 53 mm/min viste fornøden brandbeskyttelse med den givne stablingshøjde og batteritype. Det var primært pap der bidrog til branden førend sprinkleranlægget slukkede branden.

Af studiet fremgår ligeså anbefalinger til sprinklerklassifikation afhængig af batterioplag. Ved oplag på enkeltpaller med stabling indtil 1,5 m, bør sprinkling af klassifikation HC-3 iht. [FM Global 3-26, 2014].

Ved stabling i tre lag indtil 4,6 m højde, bør sprinkler udføres som *quick-response* med aktiveringstemperatur højst 74°C.

5.2 FM Global: Development of Sprinkler Protection Guidance for Lithium Ion Based Energy Storage Systems

[Ditch and Zeng, 2019] omfatter eksperimentelle studier på effekten af sprinkling ved større BESS-installationer. Studiet omfatter *small-to-large* skala forsøg på BESS-installationer af både LFP, LNO og LMO. Forsøget omfatter bl.a. to fuldskalaforsøg på 100 kWh Tesla Power Rack systemer. Øvrige forsøg omfattede BESS af størrelser 5,16 kWh og 7,80 kWh for hhv. LFP og LNO/LMO sammensætninger. Alle installationer blev testet med SOC på mindst 95%.

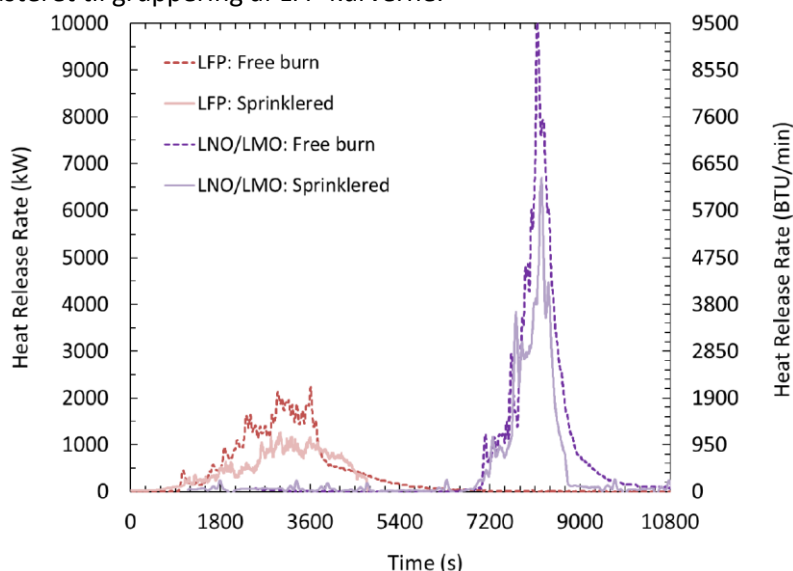
Der blev udført tests i forskellige opstillinger, som rangerede mellem test af enkelt modul (hhv. 5,16 kWh for LFP og 7,80 kWh for LNO/LMO) indtil 16 moduler. Det blev fundet blandt alle testene, at LFP resulterede i en mindre fare end LNO/LMO batterierne. I et forsøg blev et BESS med LFP kontrolleret til et modul af sprinkleren, hvorimod LNO/LMO forårsagede brandspredning til øvrigt modul, samt aktiverede sprinklere i et areal større end 230 m².

Med en sammensætning af LFP moduler til en BESS systemkapacitet på 83,6 kWh, blev det for usprinklede BESS anlæg konkluderet, at den fornødne afstand til andet brandbart oplag bør være mindst 1,8 m og 1,2 m til andet ubrændbart oplag. For sprinklede anlæg blev det fundet, at afstanden til brændbart oplag bør være mindst 1,1 m og 0,9 m til ubrændbart oplag. Det blev tillige fundet, at sprinkleranlæg mindst skal dimensioneres til et dækningsareal på 230 m² med en vandforsyning til mindst 90 min.

Med en sammensætning af LNO/LMO systemer i en konfiguration af 125 kWh, blev det fundet, at der for usprinklede BESS anlæg mindst skal være 4,0 m til brændbart oplag og 2,4 m til ubrændbart oplag. Med sprinklerbeskyttelse blev det fundet, at afstanden til brændbart oplag mindst skal være 2,7 m og mindst 1,8 m for ubrændbart oplag.

Det blev tillige fundet, at vandforsyningen skal dimensioneres til mindst 45 min gange antallet af systemer placeret med en horisontal afstand mindre end 2,7 m.

Af Figur 5-1 fremgår gengivelse af HRR kurver fra [Ditch and Zeng, 2019]. Det bemærkes, at tiderne er justeret til gruppering af LFP-kurverne.



Figur 5-1: HRR kurver som funktion af tid for 83,4 kWh LFP og 125 kWh LNO/LMO batterier både sprinklet og usprinklet, gengivet fra [Ditch and Zeng, 2019].

5.3 Sverige: Brannrisiko ved lagring av ikke-tilkoblede litium-ion og litiumbatterier

I [Bøe and Glansberg, 2019] beskrives erfaringer ved oplag af udtjente litium-ion fra Sverige og Norge. Der differentieres mellem batteriimportører, aktører der videredistribuerer batterier blandt andet materiale samt genbrugsstationer.

For batteriimportører er erfaringsgrundlaget baseret på kontakt med importører. Herfra berettes det, at batterier bliver leveret under transport standard UN3480 [United Nations, 2019]. Ydermere, beskrives test-kriterier fra UN3480 at indvirke til at mindske sandsynligheden for TR. For batterier med førnævnte begrænsning på SOC og øvrige forhold fra UN3480 [United Nations, 2019], opmagasinert i pallelag, sammenlignes brandrisikoen med ordinært gods i pallelag. Herved skal forstås, at opmagasinering af batterier i pallelag således ikke tilskrives en ekstraordinær brandrisiko.

De største faremomenter beskrives at være ifm. flytning af oplag. Herved tilskrives risikoen at være mekanisk skade ved tab af gods eller lignende.

For aktører, der opmagasinerer batterier som del i et større sortiment, beskrives en SOC på mellem 50% og 95%. Dette forårsager en forøget risiko ved håndtering, da risikoen ved svigt angives proportional med SOC. Ved SOC mellem 50% og 95% beskrives batterierne med en større risiko, da cellerne bliver mere ustabile. Det beskrives dog også, at sådanne oplag typisk vil værre mindre og samtidig mere spredt.

Fra rapporten konkluderes læringspunkter tillige efter opdeling af opmagasineringsstype. For importører/forhandlere anbefales det at opmagasinere batterier med lavest mulig SOC, mindske risikoen for mekanisk skade samt sikker afstand til antændelseskilder.

For genbrugsstationer anbefales det at begrænse mængden af brændbart oplag per depot, nedsænke udtjente batterier i ubrændbar granulat (henvises konkret til vermiculit). Det anbefales, at batterier placeres i lag af ca. 20 cm batterier adskilt af 10-15 cm ubrændbar granulat. Øvrige anbefalinger til genbrugsstationer lyder fornøden ventilation, håndslukningsmateriale samt god afstand til andet brændbart oplag.

5.4 Norge: Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression

[Gully et al., 2019] omfatter et større eksperimentelt og numerisk studie af eksplosionsrisici ved BESS. Rapporten er udarbejdet med fokus på maritim sikkerhed. Der blev udarbejdet forsøg på både batterier af typen NMC og LFP.

Det blev fundet, at direkte injektion med skum i kabinettet af BESS anlæg viste de bedste slukningsmuligheder. Dette både med henblik på at slukke aktuelt brændende batterier, samt hindre brandspredning.

Det blev også fundet, at højtryks vandtågesystemer var kapable til at hindre brandspredning og slukke brændende batterier. Ydermere, viste vandtågesystemer evnen til at binde giftige gasser med vandmolekylerne, hvormed gasserne blev udvasket. Vandtågesystemets evner skal sandsynligvis tilskrives vanddråbestørrelsen, der ved "trækkes" mod det aktuelt brændende batteri. Herved bliver kølingen ved fordampningen i en højere grad målrettet de brændende battericeller. Vanddråbestørrelsen sikrer tillige et større samlet overflade af vand i rummet (sammenlignet med konventionel sprinkling), hvorfor reaktiviteten med de udskilte gasser fra batterierne øges.

For konventionelle sprinklersystemer blev det konkluderet, at de var i stand til at hæmme brandspredning men ikke i stand til at slukke aktuelt brændende batterier. Ydermere, blev det observeret, at sprinklerdråberne var i stand til at "forskyde" de eksplosive gasser. Denne forskydning af gasserne blev observeret til at kunne forårsage lommer af eksplosive gasser, der oversteg LEL. Der blev angivet en sandsynlighed for, at lommerne kunne opstå i områder, hvor personer kan opholde sig. Eksplosionerne blev rapporteret til at kunne være dødelige og ske førend IDLH forhold kunne optræde fra øvrige giftige gasser.

Under TR forekommer der udskilning af oxygen i takt med, at komponenter i battericellerne nedbrydes. Denne udskilning af oxygen blev ikke fundet fornøden til at drive branden uden for batterisystemet. Det blev dog fundet, at oxygenudskilning er en central faktor i hastigheden af TR. Det udskilte oxygen skal således forstås som drivmiddel for den lokale forbrænding omkring den enkelte battericelle, hvilket accelererer varmeudviklingen til naboceller, som dermed initierer TR i nabocellerne.

Det blev konkluderet, at CO, NO₂ og HCL var de primære giftige gasser. Det var de disse gasser, der tidligst opnåede deres respektive grænseværdier for IDLH. Det blev vurderet, at alle tre gasser bør tages i betragtning, førend brandrummet tilgås.

Det blev tillige fundet, at den primære gas i afgangningen var CO. Den var primær i udslippet i den længste tid. I de tidlige TR-forløb blev det fundet, at gasserne (primært CO) var koldere end den omsluttende atmosfæriske luft og dermed tungere. Detektering alene på baggrund af LEL-grænseværdier blev fundet utilstrækkelig. Ordinære optiske røgdetektorer blev fundet til at være fornødent til at detektere branden i tidligere stadier. Det blev også fundet, at ved tidlig detektering og efterfølgende udkobling af den overophedende battericelle, at overophedningen kunne begrænses førend TR skete.

Det blev fundet, at der bør ventileres for eksplosive gasser med udgangspunkt i gasudslip i battericeller. Ventilationsgraden bør dimensioneres med baggrund i rumvolumen og størrelsen af den enkelte battericelle.

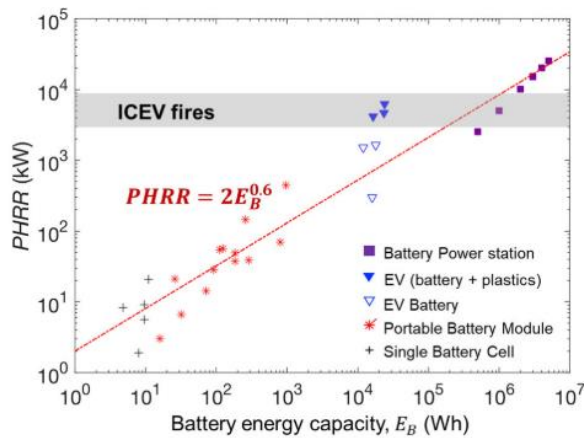
5.5 Brandbelastning, brandeffekt og brandtilvækst

Der mangler generel offentligt tilgængelige forsøg med brandbelastning og brandeffekter på store litium-ion batterier. Forskningsartikler er ofte baseret på enkelte eller få celler samt forsøg på frem-skrivninger baseret på så batterier.

[Ping et al., 2018] fandt frem til at et enkelt LiOn 18650 Panasonic battericelle havde en heat release rate på 11,8 kW og 163,1 kJ eller 0,94 kW/Wh og 13,0 kJ/Wh¹.

[Sun et al., 2020] har forsøgt at opsætte formler for udregning af brandeffekten $PHRR = 2 \cdot E_B^{0.6}$, hvor PHRR er i MW og E_B er kWh. Formlen er baseret på studier af forskellige forsøg og brande. Det skal nævnes at der er stor usikkerhed forbundet med formelen. Se Figur 5-2 for PHRR som funktion af batteriets kapacitet.

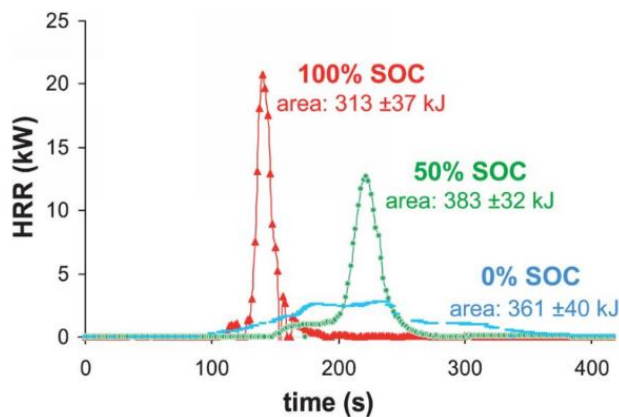
¹ Bemærk distancering mellem energi/effekt fra brand og energi fra batteri.



Figur 5-2 PHRR som funktion af batterikapaciteten, gengivet fra [Sun et al., 2020].

Brandbelastningen har også mange forskellige målinger og de relevante forskningsartikler er ligeledes bygget på mindre batterienheder. Brandbelastningen i forhold til batterikapaciteten kan findes til mellem 2-30 kJ/Wh [Larsson et al., 2014] og [Larsson and Mellander, 2014].

Brandbelastningen og brandeffekten er også afhængig af opladningsgraden (SOC). Resultater for brandeffekten ved forsøg af [Ribièrè et al., 2012], ses på Figur 5-3. Ved transport af batterier i luftfarten kan der være krav om at batterierne, der ikke en del af noget udstyr, kun har en SOC på 30 % jf. International Air Transport Association (IATA)'s vejledninger.



Figur 5-3 Brandeffekten ved forskellige opladningsgrader (SOC) [Ribièrè et al., 2012].

Af HRR kurver vist på Figur 5-1, er brandtilvækstfaktoren for usprinklede LNO/LMO estimeret til 0,0081 kW/s². Estimatet er beregnet med baggrund i tidspunktet, hvortil effekten tiltager første gang. Brandtilvæksten er således estimeret konservativt. Sammenlignes den estimerede brandtilvækst med værdier i [BR 18, vejl. kap. 5, kap. 8, 2021], korresponderer det til mellem langsom og mellem brandtilvækst.

5.6 Udledning af giftige gasser

Når trykket i et Li-ion batteri bliver for stort og batterikassen brydes, vil batteriets flydende elektrolyt (ofte LiPF₆, se afsnit 3) blive frigivet til omgivelserne. Når det sker, vil elektrolytten gå i kemisk forbindelse med atmosfærens luftfugtighed, og de giftige gasser fosforyl fluorid (POF₃) og hydrogenfluorid (HF) bliver dannet på følgende måde:



POF₃ er dog meget ustabil, og vil hurtig omdannes til andre stoffer, hvorimod HF er et såkaldt stabilt slutprodukt. HF adskiller sig fra andre velkendte forbrændingsbiprodukter såsom karbonmonooxid (CO) og karbondioxid (CO₂), fordi disse biprodukter tager iltens plads på blodlegemerne, og derved kvæler kroppens vitale organer. Det er dog en proces som kan omvendes, hvis den stoppes i tide og den skadelidte forsynes med nok ilt. HF derimod går i forbindelse med selve lungevævet hvorved der dannes flussyre, som permanent kan ødelægge selve lungen.

HF kan teoretisk også optages igennem huden, men studier har vist at dette ikke er nær så farligt som ved indtagelse igennem luftvejene. Der henvises her til et regnet eksempel fra en rapport fra svenske MSB [Wingfors et al., 2021]. Men det skal for enhver pris undgås at HF kommer i luftvejene.

Jf. Beredskabsstyrelsens specifikke indsatskort for HF (indsatskort nr. UN 1052) [BRS UN 1052, 2020] er grænsen for dødelighed (IDLH-værdi) på blot 30 PPM. Røgfaner fra frie afbrændinger er derfor, som alle andre brande, giftige. Men foregår forbrændingen i et lukket rum, vil HF'en kunne akkumulere til farlige koncentrationer. Dette er anskueliggjort i et specialeprojekt fra Master i brandsikkerhed på DTU [Jensen, 2021], hvor resultater i form af HF-målinger fra et fribrands eksperiment er givet i en række CFD-simuleringer. Redningsberedskaber skal derfor, ifm. indsats i rum med oplag af Li-ion batterier, være meget opmærksomme på den potentielle fare ved HF-eksponering. Derfor bør røgdykkere være forsynet med indikatorer som kan registrere en eventuel tilstedeværelse af HF.

Mængden af udledt HF fra en brand i et Li-ion batteri er noget usikker, og afhænger af flere faktorer end blot batteriets kapacitet (kWh). Målinger fra fuldskalaforsøg har givet følgende resultater:

- Li-ion batteri på 16,5 kWh udledte 1,54 kg HF (0,093 kg/kWh)
- Li-ion batteri på 23,5 kWh udledte 1,47 kg HF (0,063 kg/kWh)

Resultater fra mindre batterier bør derfor ikke ekstrapoleres til større batterier, da det er forbundet med stor usikkerhed. Hvad der dog vides med sikkerhed er, at den indledende mængde af udledt HF i stor grad afhænger af et batteris opladningsgrad (SOC). Dette blev konkluderet af [Larsson et al., 2017], hvor udledning af HF fra afbrænding af fra et Li-ion batteri blev observeret ved forskellige lade niveauer. Ved et lade niveau på 100% er den indledende udledning af HF op til 3 gange så høj som ved batterier med et lade niveau på 50% og nedefter.

6 Diskussion af nyeste viden

6.1 Samlet kapacitet af BESS

Anbefalinger af begrænsninger på kapacitet af BESS kan betragtes fra forskellige vinkler. Der kan tages udgangspunkt i anbefalinger/krav vejledninger fra andre lande eller interessenter som forsikringsselskaber (se afsnit 6.1.1). Det kan også betragtes ud fra en risiko for der opstår en brand. Dvs. både mht. sandsynligheden for en fare opstår (se afsnit 6.1.4) eller størrelsen af konsekvenserne (se afsnit 6.1.2). Der kan også ses alene på omfanget af konsekvenserne.

6.1.1 Oplag ift. relevante vejledninger og forsikringsselskaber

Med baggrund af viden præsenteret i afsnit 3-5 diskuteres nyeste, relevante viden i nærværende afsnit. Af de præsenterede vejledninger og forskningsmateriale beskrives værdier i spændet 50 kWh til 125 kWh. Af [NFPA-855, 2020] fremgår grænseværdier for individuelle anlæg på 50 kWh. Af [Ditch and Zeng, 2019] fremgår testede anlæg med en kapacitet indtil 125 kWh. De testede anlæg viste maksimale HRR op til 10 MW ved usprinklede anlæg.

Sammenholdes data fra brandforsøg af 125 kWh BESS anlæg fra [Ditch and Zeng, 2019], fremgår det, at det installerede sprinkleranlæg ikke viste fornøden slukkende effekt til at modvirke brandspredning mellem modulerne i det brændende BESS anlæg. Dette fremgår tillige af Figur 5-1, hvor en maksimal brandeffekt på ca. 6,5 MW opnås for det sprinklede anlæg.

Af [NFPA-855, 2020] anbefales grænseværdier for enkeltanlæg til 50 kWh. Sammenholdes fund fra [Ditch and Zeng, 2019] med øvrige udfordringer ved brand i BESS anlæg, såsom toksicitet, vandmængder samt masse, vurderes det, at en grænseværdi for kapaciteten af ét anlæg på 50 kWh er fornuftig.

I direkte forlængelse af ovenstående, skal forhold vedrørende brandspredning iagttages. Af forsøg fra [Ditch and Zeng, 2019] blev anbefalinger til afstande til mindskelse af brandspredning fra strålingsvarmen oplyst. Under nærværende beskrivelse, blev anbefalede afstande fremsat for både sprinklede og usprinklede tilfælde, se afsnit 5.2. Af betragtningen fra [Ditch and Zeng, 2019] var det alene strålingsvarmen fra bålet, som blev iagttaget. Det anbefales tillige, at risikoforhold ved overtændte brande overvejes. Dette bør iagttages i både sprinklede og usprinklede brandmæssige enheder samt i tilfælde af sprinklersvigt.

Det anbefales, at den maksimale BESS kapacitet, der tillades i en brandmæssig enhed ((R)EI 60 / A2-s1,d0) er 600 kWh. Heraf bør det sikres, at hvert anlæg højst udføres med kapacitet på 50 kWh. Herved kan TR begrænses i den brandramte brandmæssige enhed ((R)EI 60 / A2-s1,d0), selv ved svigt af sprinkleranlægget.

Ved krav om maksimal kapacitet på højst 600 kWh, tilføjes robusthed overfor sprinklersvigt.

6.1.2 Kapacitet ift. konsekvenser

Der er stor usikkerhed forbundet med kvantificering af brandeffekt, brandbelastning og udledning af giftige gasser. Det frarådes generelt at ekstrapolere, da der er stor usikkerhed forbundet med dette. Formodentligt giver ekstrapoleringer for høje værdier for brandbelastningen og mængder af HF-gasser. Værdierne fundet ved ekstrapolering skal bruges med stor forsigtighed.

Konsekvenserne vil være en del lavere, når opladningsniveauet er lavt. Ved at opbevare batterierne ved et lavere SOC, så vil konsekvenserne blive reduceret.

6.1.2.1 Afstand til andet brandbart oplag

Det er blevet beskrevet i tidligere afsnit, at det er vanskeligt at afbryde TR individuelt i battericeller og moduler. Der er således en risiko for, at TR spreder sig fra batterimoduler i BESS'er, selvom der sprinkles. TR bør således forventes at forsætte indbyrdes i BESS'erne, hvorfor den eneste mulighed for at afbryde TR er ved afstand til nærmeste moduler. Konsekvensen ved brand i BESS'er er således proportional med mængden af batterier, der indgår i TR, og dermed også proportional med afstanden mellem BESS'er.

NFPA foreslår indbyrdes afstand på 0,9 m for sprinklede bygningsafsnit for BESS'er indtil 50 kWh. [Ditch and Zeng, 2019] foreslår 2,7 m og 4,0 m horisontal afstand for hhv. sprinklede og usprinklede bygningsafsnit for BESS'er indtil 125 kWh. Mindste horisontale afstand er således proportional med både den kemiske sammensætning af litium-ion BESS'en og kapaciteten.

6.1.3 Detektering

I [Gully et al., 2019] blev forhold vedrørende lækage af eksplosive gasser, uden synlig antændelse, beskrevet. Her blev det beskrevet, at der i sådanne tilfælde er risiko for, at de lækkede gasser kan være kolde, hvormed de ikke kan garanteres at drive mod loftet.

Det blev beskrevet, at optisk detektering var fornødent til at detektere førend der skete TR. I forsøgene var der placeret optiske detektorer ved både gulv og loft.

6.1.4 Kapacitet ift. en risikovurdering

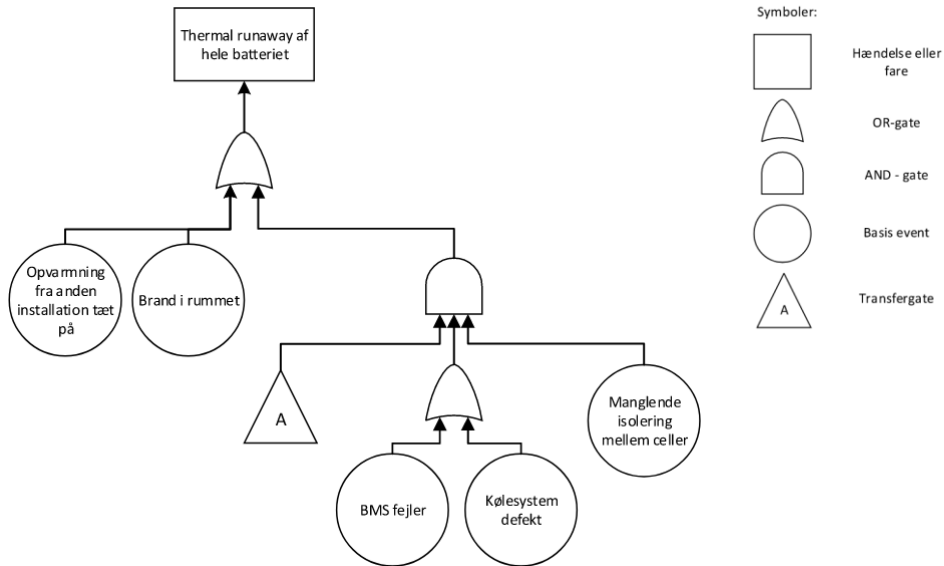
Den samlede kapacitet kan betragtes ud fra hvilken sandsynlighed der vil være for en brand starter samt konsekvenserne. Konsekvenserne beskrives alene i afsnit 6.1.2, men ved at se samlet på sandsynligheden og konsekvenserne kan der gives anbefalinger for oplagsstørrelser.

Ikke-tilsluttede batterier på f.eks. et lager har lavere sandsynlighed for, at en brand opstår som i BESS, da der ikke er risiko for fejlopladninger eller fejlafladninger samt eksterne kortslutninger. Det kan derfor overvejes om oplagsstørrelser kan øges i forhold til den lavere sandsynlighed. Konsekvenserne vil være på samme niveau for så vidt angår brandbelastning og brandeffekt fra tilsvarende batterier der er tilsluttet.

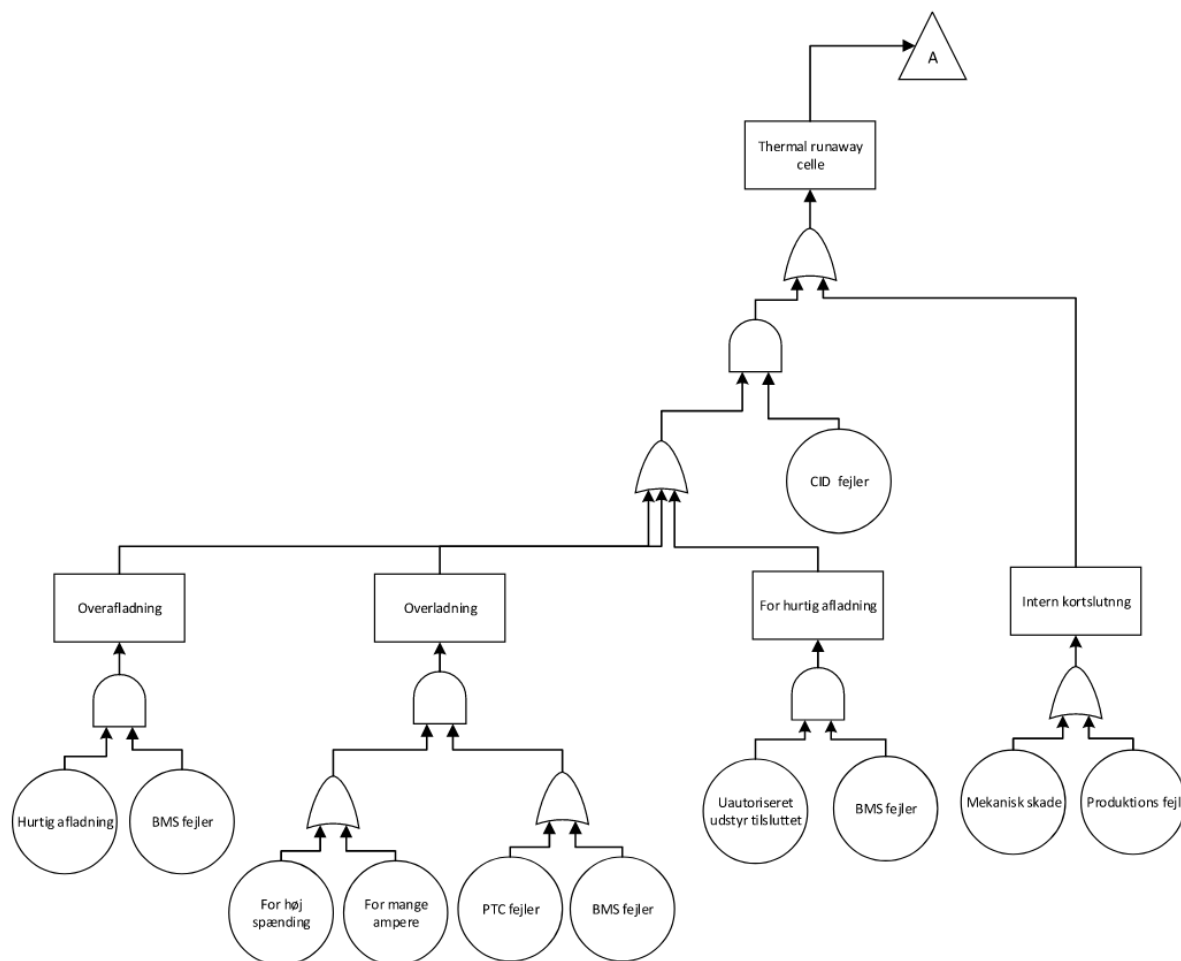
I [Andersen, 2017] blev der udarbejdet en fejltræsanalyse på hvilke årsager, der kunne medføre TR i et tilsluttet batteri (f.eks. i BESS). På Figur 6-1 ses fejltræsanalyse for TR i hele batteriet og på Figur 6-2 ses fejltræsanalyse for TR i den enkelte battericelle. Forklaringer af de anvendte forkortelser fremgår af ordlisten, se afsnit 2.

Batterierne kan være opbygget forskelligt og på figurerne er der indbygget forskellige sikkerhedssystemer, som ikke findes på alle batterier. Ved at foretage en risikoanalyse kan sandsynligheder for at TR opstår nedbringes. Mekaniske skader, ekstern opvarmning, dårligt Battery Management System

(BMS) og dårlig kvalitet er nogle af de årsager, som medfører de største sandsynligheder for at TR opstår.



Figur 6-1 Fejltræsanalyse for TR i batteri. Th. ses de anvendte symboler. Ved "AND-gate" skal alle forudgående hændelser ske for at næste hændelse kan ske. Ved "OR-gate" skal kun én af hændelserne opfyldes. "A" er transfergate, hvor resten af fejltræet ses på Figur 6-2.



Figur 6-2 Fejltræsanalyse for TR i battericelle – skal læses i sammenhæng med Figur 6-1.

6.2 Aktive anlæg

6.2.1 Automatisk vandsprinkling

Af forhold beskrevet i afsnit 4 og 5 fremgår effekten af sprinkleranlæg uomtvisteligt. Dette både for BESS'er og ved stablet oplag af litium-ion batterier.

Sprinkleranlæggenes rolle skal i nærværende beskrivelse forstås ved dets evne til at køle batterier, der endnu ikke indgår i branden, og derved ikke nødvendigvis slukke branden fuldstændigt. Sprinkleranlæggenes kan derfor, som udgangspunkt, ikke forventes at virke slukkende, men således kun kontrollerende. Det blev således også beskrevet i [Gully et al., 2019], hvor særligt udskilningen af oxygen var fornøden til at drive branden lokalt i den brandramte battericelle.

Som beskrevet tidligere, er konsekvenserne ved en brand i BESS'er, eller oplag af batterier, proportional med mængden af involverede battericeller. Det vil sige, at ved at reducere brandspredningen til batterimoduler nærtstående det brandramte batterimodul, vil konsekvensen af branden direkte blive mindsket.

Særligt fra [Ditch and Zeng, 2019] og [Ditch, 2016] blev det pointeret, at der bør stilles særlige skær-

pede krav til sprinkleranlæg, da både BESS'er og oplag af litium-ion batterier, kan være særligt omfattende eller kræve tidlig aktivering. Krav til sprinkleranlæg samt vandforsyning er af det førnævnte beskrevet efter en High Hazard betragtning.

For stablede oplag blev det beskrevet, at indtil sprinkleraktivering, var det primært emballage, der indgik i branden. Dette betyder således, at det initiale brandforløb er sammenligneligt med ordinære brandforløb for almindeligt oplag, hvorved sprinkleraktivering kan estimeres ved ordinære metoder.

6.2.2 Ventilation af eksplosive gasser

I [Gully et al., 2019] blev det beskrevet, at der blev observeret afgasning af eksplosive fra litium-ion batterier uden, synlig antændelse. Der blev foreslået en metode til bestemmelse af retvisende luftskifte på baggrund af Ah kapaciteten af battericellerne. Ventilationen blev foreslået aktiveret ved detektering, hvor optiske detektorer blev fundet at kunne detektere førend TR sker. Det er uvist, med hvilken sandsynlighed gaslækage sker. Det er eksempelvis ikke påskrevet i NFPA 855, at der skal være mekanisk ventilation for litium-ion batterier.

6.3 Håndtering af brugte batterier

Opmagasineret af udtjente litium-ion batterier kan være fra genbrugspladser eller indsamlingssteder fra genbrugspladser samt leverandører der indsamler brugte batterier for senere at genanvende disse. Da man ikke altid kender standen af de brugte batterier eller kapaciteten, så bør der tages højde for dette vedrørende anbefalingerne. Opladningsgraden (SOC) kan også være svær at kende især på genbrugspladser.

I de tilfælde hvor kapaciteten af batterierne ikke kendes, kan kapaciteten omregnes til en vægt eller volumen ud fra erfaringstal for energitætheden. Energitætheden for litium-ion batterier ligger i intervallet 50-260 Wh/kg eller 250-670 Wh/L.

6.4 Placering i en bygning

De primære årsager til TR er mekanisk misbrug, over/under afladning samt termisk påvirkning. Af beskrevne forhold i afsnit 6.1.2.1 beskrives forhold vedrørende reduktion af risiko ved termisk påvirkning. Det bør tillige overvejes, hvordan risikoen ved mekanisk misbrug nedbringes. I denne henseende kan sandsynligheden for mekanisk misbrug sænkes ved at placere BESS'er i områder med lav trafik. Herved skal forstås, at BESS'er placeres væk fra områder med personer eller køretøjer såsom trucks eller andre køretøjer.

Der bør tages højde for bygningens brug ved placeringer af større litium-ion batterier. Hvor der er overnatning, mange personer eller personer der ikke kan evakuere ved egen hjælp, skal det sikres at de ikke udsættes for den meget giftige røg mens evakueringen pågår.

6.4.1 Placering i afsnit med kælderfunktion

Indsats i kældre er ofte udfordrende, da der kan være komplicerede indsatsvej og sværere at udføre røgdudluftning under indsatsen. I lukkede rum vil der hurtigt kunne ske en høj koncentration af brandrøg og for TR også en større koncentration af HF-gasser.

Eftersom TR ikke er mulig at slukke men kun begrænse spredningen, vil indsatstaktikken kunne være at flytte litium-ion batteriet udendørs. Dette vil være svært ved større batterier. Dels grundet vægten, varmen og de giftige gasser. I en kælder, hvor der kun er adgang via trapper vil dette kun kunne ske med stort besvær.

Det bør derfor nøje overvejes, om placeringer af større litium-ion batterier kan ske andre steder en i kælder eller sikre, at der f.eks. er en rampe, hvorfra batteriet kan bugseres ud.

6.5 Placeringer i det fri eller i container

BESS anlæg kan placeres i det fri og med en passende afstand fra andre bygninger, vil det kunne reducere risikoen for, at personer eller andet materiel bliver påvirket direkte ved en brand. Brandrøgen vil hurtigt blive fortyndet i luften og koncentrationerne vil dermed være lave. Indsatsforholdene vil være bedre ved at slukningsindsatsen kan ske fra det fri og væk fra røgfanen.

Placeringer af BESS i containere vil ligeledes kunne reducere risikoen for, at personer bliver påvirket direkte ved en brand. Koncentrationer i containeren kan dog blive store og det bør sikres, at der kan ske en ventilering af containeren. Evt. kan der suppleres med et alarmsystem, så redningsberedskabet kan foretage en tidlig indsats og ventilere containeren tidligt i brandforløbet. Indsatsen vil også kunne ske i passende afstand.

7 Indsatsforhold

Da både redningsberedskabet og brugere af faciliteterne potentielt, ved brande i Li-ion batterier, kan blive udsat for røggasser, som er mere skadelige end de mest velkendte afbrændingsbiprodukter (såsom CO og CO₂), er det vigtigt at der tages de nødvendige forholdsregler i forbindelse med slukningsindsatsen.

Det er vigtigt at redningsberedskabet allerede ved ankomst bliver gjort bekendt med, at der er tale om en brand involverende Li-ion batterier. Dette fordi de dermed allerede i forberedelserne kan tilpasse indsatsen til de udfordringer en Li-ion brand giver.

Den største udfordring hvor et Li-ion-batteri er gået i TR, ligger i, at den kemiske proces inde i batteriet er både selvoxiderende og selvforstærkende. Dette vil sige, at redningsberedskabet ikke kan gøre brug af deres almindelige primære indsatstaktik med at kvæle branden. Der skal kontinuerligt bruges meget store mængder vand, og da HF bindes til væske (vandopløseligt i ethvert forhold) kan vandet være kontamineret og skal muligvis håndteres som giftigt slukningsvand. Det vil derfor ved store oplag være nødvendigt at der ved faciliteterne er etableret tilstrækkelig privat vandforsyning, der kan forsyne indsatsen.

Såfremt det er muligt, vil det være formålstjenstligt hvis der i gulv eller terræn ved batterioplæg findes forsænkninger eller kar, hvori batteriet kan placeres, som redningsberedskabet kan fylde med vand. På den måde kan batteriet brænde færdig nedsænket i vand, og ikke længere være til fare for omgivelserne. Ydermere vil slukningsvandet kunne håndteres efterfølgende.

I forbindelse med den endelige slukning bør røgdykkere i videst muligt omfang blive ude af selve røgfanen, og i øvrigt være forsynet med anordninger som kan registrere tilstedeværelse af hydrogenfluorid. I den forbindelse skal der gøres opmærksom på, at forsøg har vist at udledningen af HF øges ved at påføre vand direkte på de brændende battericeller.

Såfremt røgdykkere har været udsat for HF, skal de ved aflægning af udstyr være meget opmærksomme på, at selve røgdykkermasken er det sidste der aflægges. Aflagt udstyr bør overhældes med rigelige mængder vand og efterfølgende køres til rens.

I forlængelse af ovenstående beskrivelse er det dog væsentligt at bemærke, at der også forekommer giftige gasser ved brande i ordinære brændsler. I [Lecocq et al., 2012] blev der foretaget målinger af HF-udledning fra brande i konventionelle køretøjer sammenlignet med brande i biler med elektrisk drivkraft. Her blev det fundet, at HF, NOX, HCL samt HCN også i høj grad blev fundet i røggasser fra brande i konventionelle køretøjer.

8 Sammenfatninger af anbefalinger

Det anbefales, at bygningsafsnit indeholdende litium-ion batterioplag differentieres på baggrund af oplagsmængde, bygningens øvrige brug, aktive brandsikringsforanstaltninger, om litium-ion batterier er tilsluttet samt litium-ion batteriernes kondition og historik. Anbefalingerne oplistes nedenfor, hvor der særligt er differentieret mellem, om det omfatter BESS, nye oplag eller oplag af udtjente batterier. Ydermere, er anbefalingerne sammenfattet i tabeller nedenfor på baggrund af førnævnte kriterier.

Brandeffekten, brandbelastningen og mængden af udledning af giftige gasser afhænger af batterikapaciteten og batteriets kemiske opbygning. Anbefalinger for grænseværdier bør opstilles som batteriernes kapacitet i kWh frem for batteriets vægt eller volumen. Dog kan dette være svært ved udtjente batterier, hvorfor grænseværdier kan sættes efter vægt eller volumen.

Der skelnes ikke mellem forskellige batterikemier indenfor litium-ion batterier i de nedenstående anbefalinger. Hvis det kan dokumenteres, at en bestemt batterikemi har meget lave konsekvenser ved brand og uheld, så kan det overvejes om mængderne kan øges.

Det anbefales, at BESS, lagrer af nye eller brugte batterier bør følge anbefalinger i nedenstående beskrivelse, når kapaciteten overstiger 20 kWh.

Da der sker stor udvikling i energitætheden og opbygningen af litium-ion batterier anbefales det at nedenstående anbefalingerne løbende skal justeres og revideres. Nærværende anbefalinger sker med udgangspunkt i overordnede grænseværdier fra [NFPA-855, 2020] for BESS. Med kvalitative risikovurderinger beskrives anbefalinger til grænseværdier for de samlede kapaciteter for tilsluttede/ikke-tilsluttede samt brugte batterier mht. placeringer, brandsikringstiltag, indsatsmuligheder og lignende. Anbefalingerne baserer sig på generelle danske praksisser for brandsikring samt europæiske standarder.

I Tabel 8-1 ses oversigt over anbefalinger. I de efterfølgende afsnit uddybes anbefalingerne.

For alle nedenstående scenarier anbefales det, at der skiltes med, at der opbevares litium-ion batterier, så redningsberedskabet er oplyst om faren og kan foretage passende indsats.

Ved placeringer i bygninger eller i containere bør der udarbejdes ordensregler om at der ikke placeres brandbart oplag og affald i lokalerne, at lokalerne skal være rene og ryddelige samt at batterierne skal håndteres, så de ikke udsættes for mekaniske skader.

Forslag til brandtekniske krav til BESS og oplag af litium-ion batterier

Tabel 8-1 Oversigt over anbefalinger

Type	Placering	Kapacitet	Passiv sikring	Aktiv sikring	Indsatsforhold	Bemærkninger	Afsnit
For alle typer	-	-	-	-	Mulighed for at flytte batterierne udendørs.	Skiltning med, at der opbevares li-ion batterier i bygning, bygningsafsnit eller containere. Over 20 kWh bør ikke placeres i bygninger med overnatning eller hvor personer ikke er selvhjulpne.	-
Tilsluttede batterier BESS	I bygning	< 50 kWh	I egen brandsektion (R)EI 60 / A2-s1,d0	-	-	-	8.1.1
		50 - 600 kWh	I egen brandsektion (R)EI 60 / A2-s1,d0 Opdeles i enheder på op til 50 kWh og 1 m mellem enhederne.	Sprinklersystem	Må kun placeres i stueplan eller kælder med rampe.	Tilslutninger og styresystem skal ske efter producentens anvisninger. Indretningen så risiko for mekanisk påvirkning mindskes.	8.1.1
		> 600 kWh	I egen brandsektion (R)EI 120-M / A2-s1,d0. Facadesikring 5 m i ydervægge (R)EI 60 / A2-s1,d0 uden åbninger. 1 m mellem enheder på op til 50 kWh.	Sprinklersystem Brandventilation	Må kun placeres i stueplan. Angivelse af afbryder til installationerne på O-planer. Vejledning til BMS ved O-planer. Evt. etablering af kontinuerlig vandforsyning.	Tilslutninger og styresystem skal ske efter producentens anvisninger. Indretningen så risiko for mekanisk påvirkning mindskes.	8.1.1
	Uden for bygning	< 600 kWh	5 m fra bygninger med overflade K ₁ 10 / B-s1-d0. 0 m fra bygninger med facader med brandmodstandsevne (R)EI 60 / A2-s1,d0. Opdeles i enheder på op til 50 kWh og 1 m mellem enhederne.	-	Sikre, at der kan ske indsats fra to sider.	Der skal være en afstand på mindst 5 m fra ventilationsindtag fra bygninger.	8.1.2
		> 600 kWh	5 m fra bygninger med overflade K ₁ 10 / B-s1-d0. 0 m fra bygninger med facader med brandmodstandsevne (R)EI 60 / A2-s1,d0. Opdeles i enheder på op til 50 kWh og 1 m mellem enhederne. 5 m mellem installationer med en samlet kapacitet på 600 kWh	-	Sikre, at der kan ske indsats fra to sider. Evt. etablering af kontinuerlig vandforsyning.	Der skal være en afstand på mindst 5 m fra ventilationsindtag fra bygninger.	8.1.2
	Container uden-dørs	< 600 kWh	Afstand 5 m fra andre bygninger. Eller: Afstand 2,5 m fra andre bygninger, hvor åbningen af containere vender væk fra bygningen og der er friholdt et areal mindst 10 m ud fra containerens åbning, og mindst i containerens bredde. Eller: 0 m fra bygninger med facader med brandmodstandsevne (R)EI 60 / A2-s1,d0.	ABA med mulighed for god ventilation (åbne låger til container).	Mulighed for indsats mindst 10 m fra åbningen. Evt. manuelt sprinkleranlæg med tilslutning fra vand fra beredskabet	Der skal være en afstand på mindst 5 m fra ventilationsindtag fra bygninger. Opdeles i enheder på op til 50 kWh og 1 m mellem enhederne.	8.1.2
		> 600 kWh	-	-	-	Se krav for BESS i bygning over 600 kWh	8.1.1

Forslag til brandtekniske krav til BESS og oplag af litium-ion batterier

Type	Placering	Kapacitet	Passiv sikring	Aktiv sikring	Indsatsforhold	Bemærkninger	Afsnit
Lager med batterier	I bygning	< 50 kWh SOC 100 % eller < 100 kWh SOC max 30 %	I egen brandsektion (R)EI 60 / A2-s1,d0	-	-	-	8.2.1
		50 - 1.200 kWh SOC 100 % eller 50 – 2.400 kWh SOC 50 %	I egen brandsektion (R)EI 60 / A2-s1,d0	Sprinklersystem	Må kun placeres i stueplan eller kælder med rampe.	Indretningen så risiko for mekanisk påvirkning mindskes. Brændbart materiale placeres mindst 5 m fra batterier.	8.2.1
		> 1.200 kWh SOC 100 % eller > 2.400 kWh SOC 50 %	I egen brandsektion (R)EI 120-M / A2-s1,d0. Facadesikring 5 m i ydervægge (R)EI 60 / A2-s1,d0 uden åbninger.	Sprinklersystem Brandventilation	Må kun placeres i stueplan. Evt. etablering af kontinuerlig vandforsyning.	Indretningen så risiko for mekanisk påvirkning mindskes. Brændbart materiale placeres mindst 5 m fra batterier	8.2.1
	Uden for bygning	< 1.200 kWh SOC 100 % eller < 2.400 kWh SOC 30 %	5 m fra bygninger med overflade K ₁ 10 / B-s1-d0. Eller: 0 m fra bygninger med facader med brandmodstandsevne (R)EI 60 / A2-s1,d0. Eller: 5 m afstand mellem batterier med en samlet kapacitet på 1.200 kWh.	-	Sikre, at der kan ske indsats fra to sider.	Der skal være en afstand på mindst 5 m fra ventilationsindtag fra andre bygninger.	8.2.2
		> 1.200 kWh SOC 100 % eller > 2.400 kWh SOC 30 %	5 m fra bygninger med overflade K ₁ 10 / B-s1-d0. 0 m fra bygninger med facader med brandmodstandsevne (R)EI 60 / A2-s1,d0. 5 m mellem installationer med en samlet kapacitet på 1.200 kWh SOC 100% eller 2.400 kWh SOC 30 %.	-	Sikre, at der kan ske indsats fra to sider. Evt. etablering af kontinuerlig vandforsyning.	Der skal være en afstand på mindst 5 m fra ventilationsindtag fra andre bygninger.	8.2.2
	Container uden-dørs	< 1.200 kWh SOC 100 % Eller < 2.400 kWh SOC 30 %	Afstand 5 m fra andre bygninger. Eller: Afstand 2,5 m fra andre bygninger, hvor åbningen af container vender væk fra bygningen og der er friholdt et areal mindst 10 m ud fra containerens åbning, og mindst i containerens bredde. Eller: 0 m fra bygninger med facader med brandmodstandsevne (R)EI 60 / A2-s1,d0.	ABA med mulighed for god ventilation (åbne låger til container).	Mulighed for indsats mindst 10 m fra åbningen. Evt. manuelt sprinkleranlæg med tilslutning fra vand fra beredskabet.	Der skal være en afstand på mindst 5 m fra ventilationsindtag fra andre bygninger.	8.2.2

Forslag til brandtekniske krav til BESS og oplag af litium-ion batterier

Type	Placering	Kapacitet	Passiv sikring	Aktiv sikring	Indsatsforhold	Bemærkninger	Afsnit
Brugte batterier	Generelt	-	-	-	-	Batterier som ikke har lidt overlast og hvor man kender batteriernes historik, kan placeres som ved "Lager med batterier".	8.3
	Genbrugsstation	Udendørs i beholdere på op til 220 l	Placeres i plastbeholder på et lag af ubrændbar granulat. De individuelle batterier må ikke berøre hinanden. Beskadigede batterier placeres i en plastikpose inden de lægges i beholderen. Når det ikke er muligt at placere flere batterier i et lag dækkes batterierne af endnu et lag ubrændbar granulat mindst 15 cm.	-	-	Plastbeholdere placeres mindst 5 m fra brandbart oplag.	8.3
	Bygning i én etage udført i ubrændbare materialer op til 600 m ²	Ikke beskadigede batterier: 600 kWh eller alternativt samlet vægt på 2.300 kg eller volumen på 900 l	5 m fra andre bygninger med overflade K ₁ 10 / B-s1-d0 og 5 m fra andet brændbart oplag.	ABA med overførsel til både beredskabet og personale samt mulighed for god ventilation.	Evt. manuelt sprinkleranlæg med tilslutning fra vand fra beredskabet	Bygningen skal være dedikeret til opbevaring af brugte batterier og må ikke benyttes til andet.	8.3
	Container uden-dørs	Ikke beskadigede batterier: 600 kWh eller alternativt vægt på 2.300 kg eller volumen på 900 l	5 m fra andre bygninger med overflade K ₁ 10 / B-s1-d0 og 5 m fra andet brændbart oplag.	ABA med overførsel til både beredskabet og personale samt mulighed for god ventilation (åbne låger til container).	Mulighed for indsats mindst 10 m fra åbningen. Evt. manuelt sprinkleranlæg med tilslutning af vand fra beredskabet	-	8.3
	Container uden-dørs (karantænecontainer)	Beskadigede eller brugte batterier, hvor historikken ikke kendes: 200 kWh eller alternativt vægt på 800 kg eller volumen på 300 l	10 m fra anden bebyggelse og andet brændbart oplag.	ABA med overførsel til både beredskabet og personale samt mulighed for god ventilation (åbne låger til container).	Mulighed for indsats mindst 10 m fra åbningen. Evt. manuelt sprinkleranlæg med tilslutning fra vand fra beredskabet	Batterierne kontrolleres efter en uge. Hvis de vurderes stabile kan de placeres som udtjente batterier som ikke er beskadiget.	8.3

8.1 Anbefalinger ved BESS installationer

8.1.1 Placering i bygninger

Det anbefales, at BESS installationer installeres i fysiske enheder på indtil 50 kWh. Dette betyder, at der kan installeres fysiske BESS installationer indtil en kapacitet på 50 kWh. Der kan placeres flere fysiske enheder i samme rum, men det afhænger yderligere af brandsikringstiltag. Denne anbefaling sker på baggrund af brandudbredelsen i enkeltanlæg, som i [Ditch and Zeng, 2019] blev beskrevet u hensigtsmæssig stor for større anlæg. Det anbefales ligeså, at BESS installationer indplaceres i egen brandmæssige enhed, da konsekvenser ved brand i BESS kan være væsentlige, samt at toksiciteten ved brande i BESS oftest giver anledning til udfordringer ved slukningsarbejdet.

For at mindske sandsynlighed for svigt i BESS installationer, anbefales det, at tilslutninger og styresystem sker efter producentens anvisninger. Det anbefales, at der ikke sker sammenkobling af BESS installationer fra forskellige producenter. Det anbefales ligeså, at indretningen sker med henblik på at mindske mekanisk påvirkning.

Det anbefales, at BESS installationer placeres i egen brandsektion uden andet brændbart oplag. For BESS installationer med en kapacitet på mere end 50 kWh bør den pågældende brandmæssige enhed sprinkles. Sprinklersystemet skal dimensioneres til den pågældende BESS installation. Det anbefales at klassificere det som High Hazard. Heraf følger en sprinkler klassifikationen på HHP3 efter [DBI-251/4001, 2016] eller lignede. Dette anbefales som følge af forsøg fra [Ditch and Zeng, 2019].

Hvor flere BESS installationer placeres i samme sprinklede brandsektion anbefales det, at de opdeles i enheder på op til 50 kWh med en afstand mellem enhederne på mindst 1,0 m.

Såfremt der i en brandsektion installeres BESS installationer med kapacitet indtil 600 kWh, anbefales det, at denne udføres som brandsektion (R)EI 60 / A2-s1,d0. Såfremt der installeres BESS installationer med en kapacitet på over 600 kWh, anbefales det, at den brandmæssige enhed udføres som brandsektion (R)EI 120-M / A2-s1,d0 samt sikring mod facadesmitte (5 m (R)EI 60 / A2-s1,d0), at der er udgang direkte til det fri samt brandventilation. Afhængig af det enkelte projekt kan aktiveringen af brandventilationen evt. ske af redningsberedskabet i stedet for at dette sker automatisk. Dette bør aftales med det lokale redningsberedskab.

Anlæg bør ikke placeres i kældre medmindre der er direkte udgang til batterierne fra rampe eller lignende. BESS med kapacitet på mere end 600 kWh bør dog kun placeres i stueplan.

Der bør sikres at beredskabet kan flytte batterierne udendørs under brand. F.eks. ved at de står på paller e.lign. så beredskabet har mulighed for at kunne trække dem ud.

Anlæg over 20 kWh bør ikke placeres i bygninger, hvor der er personer, der overnatter, er mange personer eller er personer, der ikke kan evakuere ved egen hjælp. Det skal i så fald sikres, at de ikke udsættes for den meget giftige røg mens evakueringen pågår.

Det anbefales, at der ved installationer med kapacitet større end 600 kWh ophænges vejledning til BMS, vejledning til afbryder samt plantegninger med anlægsangivelse i forbindelse med O-planer. Nærværende forhold vil forbedre indsatsmuligheden.

Det kan overvejes om der er behov for opstilling af brandhydranter eller på anden måde sikre en kontinuerlig vandforsyning ved meget store anlæg, hvor der er mere end 600 kWh pr. brandsektion.

8.1.2 Placering udendørs

Ved placering af BESS installationer udendørs anbefales det, at der gælder særlige grænseværdier. Da konsekvenserne er lave samt at indsatsmulighederne er væsentligt forbedret i forhold til placeringer i bygninger, kan de anbefalede mængder i forhold til placering i bygninger øges. Det anbefales, at udendørsoplag sker under overdækning eller i skibscontainere udført i materialer mindst A2-s1,d0. Skibscontainere bør ikke være større end 40 fod (12,03 m x 2,34 m x 2,28 m).

Det anbefales, at BESS installationer udendørs alene placeres i terræn.

Ved udendørs BESS installationer anbefales det, at der kan ske indsats fra to sider, således indsats altid kan foregå væk fra røgfanen.

BESS installationer udendørs eller i containere bør placeres mindst 5 m fra bebyggelse, hvor udvendig overflade er mindst klasse K₁10 / B-s1,d0.

Hvor containeren er placeret med længderetningen vinkelret på facaden, åbningen væk fra facaden, samt der er friholdt et areal mindst 10 m ud fra containerens åbning, kan afstanden til andre bygninger være 2,5 m.

Hvor bygningens facade er udført med brandmodstandsevne mindst (R)EI 60 / A2-s1,d0 kan BESS installation placeres direkte ved facaden. Facaden skal udføres med brandmodstandsevne mindst (R)EI 60 / A2-s1,d0 i kontaktfladen, mindst 5 m horisontal afstand til begge sider samt vertikalt til tagkant eller mindst 10 m.

Det anbefales at udendørs BESS installationer kan placeres i enheder på op til 600 kWh med en afstand på 5 m til næste enhed på 600 kWh. Det skal sikres at der er kan foretages indsats fra to sider, så indsatsen kan ske væk fra røgfanen.

Ved placeringer i containere anbefales maksimalt 600 kWh såfremt, at der kan foretages indsats i en afstand af mindst 10 m fra åbningen, at der er detektering med alarmoverførsel til redningsberedskab samt gode muligheder for ventilering ved beredskabets ankomst (mulighed for åbning i fuld bredde).

Der bør sikres at beredskabet kan flytte batterierne udendørs under brand. F.eks. ved at de står på paller e.lign. så beredskabet har mulighed for at kunne trække dem ud.

Det kan anbefales at der installeres et manuelt sprinkleranlæg, hvor redningsberedskabet kobler slukningsvand på containeren. Dette bør aftales med det lokale redningsberedskab.

Det kan overvejes om der er behov for opstilling af brandhydranter eller på anden måde sikre en kontinuerlig vandforsyning ved meget store anlæg.

Ved kapacitet større end 600 kWh anbefales det, at krav fra afsnit 8.1.1 iagttages.

8.2 Anbefalinger ved lager af litium-ion batterier

8.2.1 Placering i bygninger

Ved oplagring af rene litium-ion batterier, som ikke er tilsluttet et anlæg, er der lavere sandsynlighed for, at der opstår en brand. Ved at opbevare dem ved en lavere SOC, så vil konsekvenserne ligeledes være lavere og indsatsen nemmere. Det vurderes derfor, at det er muligt at øge mængderne for oplagring af rene litium-ion batterier i forhold til BESS installationer.

Det anbefales, at indretningen sker med henblik på at mindske mekaniske påvirkninger som ved brug af f.eks. påkørselssikring.

I usprinklede rum, som er sin egen brandsektion ((R)EI 60 / A2-s1,d0) anbefales en maksimal samlet kapacitet på op til 50 kWh. Ved en maksimal SOC på 30 % kan denne kapacitet øges til 100 kWh.

I sprinklede brandsektioner ((R)EI 60 / A2-s1,d0) anbefales en maksimal samlet kapacitet på op til 1.200 kWh. Ved en maksimal SOC på 50 % kan denne kapacitet øges til 2.400 kWh (da der er installeret sprinkling kan SOC forøges fra 30 % til 50 % ift. en usprinklet brandsektion).

Der må som udgangspunkt ikke forefindes andet brandbart materiale i rummet medmindre det placeres i en afstand af mindst 5 m.

Ved større mængder anbefales det, at den brandmæssige enhed udføres som brandsektion (R)EI 120-M / A2-s1,d0, at der er udgang direkte til det fri samt brandventilation. Afhængig af det enkelte projekt kan aktiveringen af brandventilationen evt. ske af redningsberedskabet i stedet for at dette sker automatisk. Dette bør aftales med det lokale redningsberedskab.

Lagre bør ikke placeres i kældre medmindre der er direkte udgang til batterierne fra rampe eller lignende. Lagre med kapacitet på mere end 1.200 kWh eller 2.400 kWh med hhv. SOC på 100% eller 50 % bør dog kun placeres i stueplan.

Lagre bør ikke placeres i bygningsafsnit med mere end én etage over terræn.

Der bør sikres at beredskabet kan flytte batterierne udendørs under brand. F.eks. ved at de står på paller e.lign. så beredskabet har mulighed for at kunne trække dem ud.

Lagre over 20 kWh bør ikke placeres i bygninger, hvor der er personer der overnatter, er mange personer eller er personer der ikke kan evakuere ved egen hjælp. Det skal i så fald sikres at de ikke udsættes for den meget giftige røg mens evakueringen pågår.

Det kan overvejes om der er behov for opstilling af brandhydranter eller på anden måde sikre en kontinuerlig vandforsyning ved meget store anlæg, hvor der er mere end 1.200 kWh pr. brandsektion.

8.2.2 Placering udendørs

Ved placering af lagre udendørs anbefales det, at der gælder særlige grænseværdier. Da konsekvenserne er lave samt at indsatsmulighederne er væsentligt forbedret i forhold til placeringer i bygninger, kan de anbefalede mængder i forhold til placering i bygninger øges.

Det anbefales, at udendørsoplag sker under overdækning eller i skibscontainere udført i materialer mindst A2-s1,d0. Skibscontainere bør ikke være større end 40 fod (12,03 m x 2,34 m 2,28 m).

Det anbefales, at udendørs lagre alene placeres i terræn.

Lagre af litium-ion batterier udendørs (under overdækning) eller i containere bør placeres mindst 5 m fra bebyggelse, hvor udvendig overflade på bebyggelsen er mindst klasse K₁10 / B-s1,d0.

Hvor containeren er placeret med længderetningen vinkelret på facaden, åbningen væk fra facaden, samt der er friholdt et areal mindst 10 m ud fra containerens åbning, kan afstanden til andre bygninger være 2,5 m.

Hvor bygningens facade er udført med brandmodstandsevne mindst (R)EI 60 / A2-s1,d0 kan lagre placeres direkte ved facaden. Facaden skal udføres med brandmodstandsevne mindst (R)EI 60 / A2-s1,d0 i kontaktfladen, mindst 5 m horisontal afstand til begge sider samt vertikalt til tagkant eller mindst 10 m.

Det anbefales, at udendørs oplag af litium-ion batterier kan placeres i enheder på op til 1.200 kWh med en afstand på 5 m til næste enhed på 1.200 kWh. Ved SOC på 30 % kan mængderne fordobles. Det skal sikres, at der er kan foretages indsats fra to sider, så indsatsen kan ske væk fra røgfanen.

Ved placeringer i containere anbefales maksimalt 1.200 kWh (eller 2.400 kWh ved SOC på 30 %) såfremt, at der kan foretages indsats i en afstand af mindst 10 m fra åbningen.

Ved placering i containere anbefales det at have detektering med alarmoverførsel til redningsberedskabet og gode muligheder for ventilering ved beredskabets ankomst (mulighed for åbning i fuld bredde).

Der bør sikres at beredskabet kan flytte batterierne udendørs under brand. F.eks. ved at de står på paller e.lign. så beredskabet har mulighed for at kunne trække dem ud.

Det kan anbefales, at der installeres et manuelt sprinkleranlæg, hvor redningsberedskabet kobler slukningsvand på containeren. Dette bør aftales med det lokale redningsberedskab.

Det kan overvejes om der er behov for opstilling af brandhydranter eller på anden måde sikre en kontinuerlig vandforsyning ved meget store anlæg, hvor der er mere end 1.200 kWh med SOC på 100 % eller 2.400 kWh ved SOC på 30 %.

8.3 Anbefalinger ved opmagasinering af brugte litium-ion batterier

Ved udtjente batterier, som ikke har lidt overlast, og hvor man kender til batteriernes "historik", kan samme oplagsstørrelser som ved lager af litium-ion batterier benyttes, se afsnit 8.2. Det kan være batterier der har været tilsluttet et stationært BESS anlæg, hvor de ikke har været udsat for fysisk overlast.

Det anbefales, at udendørsoplag sker under overdækning eller i skibscontainere udført i materialer mindst A2-s1,d0. Skibscontainere bør ikke være større end 40 fod (12,03 m x 2,34 m 2,28 m).

For genbrugsstationer anbefales det at nedsænke de indleverede og udtjente batterier i en ubrændbar granulat, som f.eks. vermiculit i plastbeholder med maksimal volumen på 220 liter. Det anbefales,

at brugte batterier placeres i lag af batterier adskilt af mindst 15 cm vermiculit eller lignende ubrændbare granulater. Batterierne skal holdes adskilt, således at der ikke kan ske kortslutninger ved kontakt med hinanden. Plastbeholderne opbevares udendørs og mindst 5 m fra brændbart oplag.

Der bør ske en visuel vurdering af, om batterierne er beskadiget. Kendetegn på skader kan eksempelvis være buler, revner eller ekspansion. Beskadigede batterier bør placeres i plastpose før nedsænkning i granulat for at forebygge kortslutning.

Brugte batterier bør så vidt muligt placeres udendørs eller i containere. Dog kan de placeres i mindre enetages bygninger (maksimalt 600 m²) af ubrændbare materialer, hvor der kun opbevares brugte og uskadte batterier.

Brugte batterier bør ikke opbevares i nærheden af bygninger medmindre bebyggelsen kun er for personale der håndterer de brugte batterier.

Det anbefales, at brugte litium-ion batterier med en samlet kapacitet på maksimalt 600 kWh placeres i containere eller bygninger, der kun indeholder de brugte batterier i en afstand af mindst 5 m fra anden bebyggelse, hvor udvendig overflade er mindst klasse K₁10 / B-s1,d0 samt 5 m fra andet brændbart oplag.

Det anbefales at have detektering med alarm til personalet og gode muligheder for ventilering ved beredskabets ankomst.

Det kan anbefales, at der installeres et manuelt sprinkleranlæg, hvor redningsberedskabet kobler slukningsvand på containeren. Dette bør aftales med det lokale redningsberedskab.

Det anbefales, at brugte litium-ion batterier, der har synlige skader, kommer i en karantænecontainer. I karantænecontaineren må der opbevares batterier med en kapacitet på maksimalt 200 kWh. Batterierne bør være i karantæne i mindst en uge inden de igen vurderes om der er sket yderligere deformationer (øget tryk i celler kan ses ved at celler ekspandere). Hvis batterierne efter en uge vurderes at være stabile kan de placeres sammen med brugte og uskadte batterier.

Karantænecontaineren placeres i en afstand af mindst 10 m fra anden bebyggelse og andet brændbart oplag. Containeråbningen skal ligeledes være mindst 10 m fra bebyggelsen og andet brændbart oplag.

Det anbefales, at have detektering med alarmoverførsel til redningsberedskabet samt personalet og gode muligheder for ventilering ved beredskabets ankomst.

Det kan anbefales at der installeres et manuelt sprinkleranlæg, hvor redningsberedskabet kobler slukningsvand på containeren. Dette bør aftales med det lokale redningsberedskab.

I de tilfælde hvor kapaciteterne ikke kendes, kan mængderne omregnes til en vægt eller volumen. Følgende konservative omregningsfaktorer kan benyttes: 0,260 kWh/kg eller 0,670 kWh/L.

9 Referencer

- [Andersen, 2017] Andersen, T. (2017). *Brandrisiko for batterier opladet af solceller installeret i beboelsesejendomme*. Master i brand, Technical University of Denmark.
- [Bøe and Glansberg, 2019] Bøe, A. S. and Glansberg, K. (2019). Brannrisiko ved lagring av ikke-tilkoblede litium-ion og litiumbatterier. *RISE-report 2020:30*. ISBN: 978-91-89049-28-4.
- [BR 18, vejl. kap. 5, kap. 8, 2021] BR 18, vejl. kap. 5, kap. 8 (2021). *Bygningsreglement 2018, vejl. kap. 5, kap. 8 - Eftervisning*. Bolig- og Planstyrelsen. (Version: pr. 28/9 2021).
- [BRS UN 1052, 2020] BRS UN 1052 (2020). *Hydrogenfluorid - Appendix 3*. Beredskabsstyrelsen.
- [C2, 2017] C2, I. (2017). *National Electrical Safety Code(R) (NESC(R))*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [DBI-251/4001, 2016] DBI-251/4001 (2016). *DBI Retningslinje 251/4001 - Automatiske sprinkleranlæg. Projektering, installation og vedligeholdelse (AVS)*. Dansk Brand- og Sikringsteknisk Institut. 2. udgave.
- [Direktoratet for samfunnsikkerhet og beredskap, 2021] Direktoratet for samfunnsikkerhet og beredskap (2021). Risikovurdering og håndtering av brann i litium-ion batterier. Version 1.
- [Ditch, 2016] Ditch, B. (2016). Development of protection recommendations for li-ion battery bulk storage: Sprinklered fire test.
- [Ditch and Zeng, 2019] Ditch, B. and Zeng, D. (2019). Development of sprinklerprotection guidance forlithium ion based energystorage systems. Revised october 2020.
- [EngineeringToolBox, 2003] EngineeringToolBox (2003). Specific Heat of Solids.
- [FM Global 3-26, 2014] FM Global 3-26 (2014). Property loss prevention data sheets, fire protection water demand for nonstorage sprinklered properties. April.
- [Gully et al., 2019] Gully, B., Mjøs, N., Sverud, T., Helgesen, H., Huser, A., Skogtved, J., Frithiof, N., Kostopoulos, D., and Haugom, G. (2019). MARITIME BATTERY SAFETY JOINT DEVELOPMENT PROJECT: Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression. Technical report, DNV GL AS Maritime, Høvik, Norway. Document No.: 1144K9G7-12.
- [Jensen, 2021] Jensen, J. W. (2021). Charging stations for electric vehicles in subterrain carparks. Master Thesis.
- [Larsson et al., 2014] Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., Lorén, A., and Mellander, B.-E. (2014). Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests. *J. Power Sources*, 271:414–420.
- [Larsson et al., 2017] Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., and Mellander, B.-E. (2017). Toxic fluoride gas emissions fromlithium-ion battery fires. *Scientific Reports*, 7:13.
- [Larsson and Mellander, 2014] Larsson, F. and Mellander, B.-E. (2014). Abuse by external heating, overcharge and short circuiting of commercial lithium-ion battery cells. *Electrochem. Soc.*, 161. no. 10.
- [Lecocq et al., 2012] Lecocq, A., Bertana, M., Truchot, B., and Marlair, G. (2012). Comparison of the Fire Consequences of an Electric Vehicle and an Internal Combustion Engine Vehicle . *International Conference on Fires in Vehicles*, pages 183–194.

- [NFPA-69, 2019] NFPA-69 (2019). *Standard on Explosion Prevention Systems*. National Fire Protection Association. 2019 edition.
- [NFPA-70, 2017] NFPA-70 (2017). *National Electrical Code*. National Fire Protection Association. 2017 edition.
- [NFPA-855, 2020] NFPA-855 (2020). *Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems*. National Fire Protection Association. 2020 edition.
- [Ping et al., 2018] Ping, P., Kong, D., Zhang, J., Wen, R., and Wen, J. (2018). Characterization of behaviour and hazards of fire and deflagration for high-energy Li-ion cells by over-heating. *Journal of Power Sources*, 398:55–66.
- [Rivière et al., 2012] Rivière, P., Grugeon, S., Morcrette, M., Boyanov, S., Laruelle, S., and Marlair, G. (2012). Investigation on the fire-induced hazards of li-ion battery cells by fire calorimetry. *Energy Environ. Sci.*, 5(1):5271–5280.
- [Spinner et al., 2015] Spinner, N. S., Mazurick, R., Brandon, A., Rose-Pehrsson, S. L., and Tuttle, S. G. (2015). Analytical, Numerical and Experimental Determination of Thermophysical Properties of Commercial 18650 LiCoO₂ Lithium-Ion Battery. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(14):A2789–A2795.
- [Sun et al., 2020] Sun, P., Bisschop, R., Niu, H., and Huang, X. (2020). *A Review of Battery Fires in Electric Vehicles*, volume 56. Springer US.
- [United Nations, 2019] United Nations (2019). Manual of tests and criteria. *UNITED NATIONS PUBLICATION*. Seventh revised edition.
- [Vds 3103:2019, 2019] Vds 3103:2019 (2019). Lithium-batterien. 03.
- [Wingfors et al., 2021] Wingfors, H., Magnusson, R., Thors, L., and Thunell, M. (2021). Gasformig hf vid brand i trånga utrymmen-risker för hudupptag vid insatser.